

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Meteorologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**



**Dissertação**

**Estudo de Eventos Extremos de Chuva Persistente sobre o Rio  
Grande do Sul entre 2004 e 2013**

**Raidel Báez Prieto**

**Pelotas, 2016**

**Raidel Báez Prieto**

**Estudo de Eventos Extremos de Chuva Persistente sobre o Rio Grande do Sul  
entre 2004 e 2013**

**Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Pelotas,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Mestre em Meteorologia.**

**Orientador: Prof. Dr. Mateus da Silva Teixeira**

**Pelotas 2016**

Universidade Federal de Pelotas/Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

P948e Prieto, Raidel Báez

Estudos de eventos extremos de chuva persistente sobre o Rio Grande do Sul entre 2004 e 2013 / Raidel Báez Prieto; Mateus da Silva Teixeira, orientador. — Pelotas, 2016.

76 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós Graduação em Meteorologia – Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Precipitação contínua, intensa e abrang. 2. Padrões de sequência principal. 3. Sistema frontal. I. Teixeira, Mateus da Silva, orient. II. Título.

CDD: 551.577

**Raidel Báez Prieto**

**Estudo de Eventos Extremos de Chuva Persistente sobre o Rio Grande do Sul entre 2004 e 2013**

**Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.**

**Data da Defesa: 19 fevereiro de 2016**

**Banca examinadora:**

**Prof. Dr. Mateus da Silva Teixeira. Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**

**Prof. Dr. André Becker Nunes. Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**

**Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro. Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (USP)**



***Às forças que deus nos da, sempre cheias de energia positiva,  
iluminando nosso caminho quando achamos que não tem saída.***

### ***Agradecimentos***

A minha família em Cuba, especialmente mãe e pai que desde a distância me inspiram confiança nos estudos ao sentir orgulho deles.

A minha família brasileira que desde os primeiros dias que cheguei me forneceram apoio e calor humano, dando forças para continuar estudando.

A meu Orientador e amigo Mateus pela paciência e guia em todo o trabalho feito.

A coordenação da Pós-Graduação em Meteorologia, pela confiança e ajuda que fornece aos estudantes.

A todos os professores do mestrado em Meteorologia que dia-a-dia ensinam novos e profundos conhecimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos outorgada.

A todos os verdadeiros amigos que desde Cuba me acompanham e os feitos durante estes dois anos no Brasil, com os quais sei que posso contar a qualquer hora.

# **ESTUDO DE EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA PERSISTENTE SOBRE O RIO GRANDE DO SUL ENTRE 2004 E 2013**

## **Resumo**

A chuva persistente é um fenômeno atmosférico que causa diversos impactos negativos à sociedade. Este trabalho tem como principal objetivo investigar as condições atmosféricas responsáveis por eventos extremos de chuva persistente ocorridos no estado do Rio Grande do Sul entre 2004 e 2013. Aos 24 eventos extremos identificados, uma análise de Padrões de Sequência Principais (PSP) foi aplicada com a finalidade de se obter padrões atmosféricos da sequência de campos de pressão ao nível médio do mar para os primeiros dias dos eventos. Observou-se uma maior ocorrência desses eventos no inverno, mas aqueles com maior intensidade e persistência ocorreram mais frequentemente nas estações de transição. O padrão atmosférico associado aos eventos evidencia a atuação de sistemas frontais que ficam semi-estacionários sobre a região de estudo.

**Palavras chaves:** precipitação contínua, intensa e abrangente; padrões de sequência principal; sistema frontal

# **ESTUDO DE EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA PERSISTENTE SOBRE O RIO GRANDE DO SUL ENTRE 2004 E 2013**

## **Abstract**

Persistent rainfall is an atmospheric phenomenon which cause several negative impacts on society. This study has the main purpose to investigate atmospheric conditions responsible for extreme events of persistent rainfall occurred in state of Rio Grande do Sul in the 2004-2013 period. It was applied a Principal Sequence Pattern (PSP) analysis to the 24 extreme events identified in the 10 - year period, to search for atmospheric patterns in the sea-level pressure fields within the beginning of the events. It was observed a higher frequency of occurrence in winter, but stronger and more persistent events have occurred in autumn and spring seasons. The atmospheric pattern associated with these events shows the action of frontal systems that stay semi-stationary over this region.

**Keywords:** continuous, intense and extensive rain; main sequence patterns; frontal system.

## Lista de figuras

Figura 1	Representação dos sistemas atuantes na América do Sul em baixos e altos níveis.....	20
Figura 2	(a) Exemplo das primeiras 3 componentes principais obtidas por Compagnucci et al. (2001) a partir da aplicação da ACP-T para uma amostra de dados, obtendo a partir das 3 primeiras colunas da matriz de componentes, 3 mapas com anomalias da variável altura geopotencial. Anomalias negativas ou positivas estão relacionadas às regiões de baixa ou alta pressão respectivamente que existem. (b) Para a mesma amostra de dados a aplicação da PSP, que obtêm a partir da primeira coluna da matriz de componentes, a primeira sequência principal de 5 mapas com anomalias da altura geopotencial, podendo ser analisados com sua sequência real em dias mais correlacionados.....	27
Figura 3	Representação das 18 estações meteorológicas no mapa do Rio Grande do Sul, com dados de precipitação (2004-2013) que foram utilizadas no trabalho. No lado esquerdo inferior se destaca a localização do RS dentro do Brasil.....	29
Figura 4	Representação da matriz de dados de entrada para o cálculo das PSP (Casos e os respectivos pontos de grades da PNMM nos dias selecionados).....	32
Figura 5	Representação, na Estação Meteorológica de Torres, da Primeira Característica da Chuva (Períodos com Persistência em Dias e seus Acumulados de Chuva em Milímetros). Ordenada refere-se à chuva acumulada em milímetros nos 10 anos para esta estação (com xplot e histograma) e abscissa refere-se à duração em dias	

	dos casos (com boxplot e histograma). Casos com maior persistência em dias e seus respectivos acumulados selecionados, ficam na direita da linha vertical do gráfico.....	36
Figura 6	Representação da média sazonal nas estações meteorológicas, para a seleção de casos na Segunda Característica da Chuva (Acumulados Extremos). Ordenada refere-se à chuva média sazonal acumulada em milímetros para cada estação meteorológica.....	37
Figura 7	Representação da Terceira Característica da Chuva (Abrangência Espacial). Em cada estação meteorológica se representa um gráfico com ordenada que se refere à chuva acumulada em milímetros e abscissa que se refere à duração em dias.....	38
Figura 8	Representação dos CCPE. Ordenada refere-se à chuva acumulada média em milímetros nos casos (com boxplot e histograma) e abscissa refere-se à duração dos casos em dias (com boxplot e histograma).....	41
Figura 9	Características dos CCPE no período 2004-2013. Para cada estação do ano, a barra esquerda refere-se à média dos acumulados de chuva dos casos (mm, eixo Y esquerdo), a barra da direita refere-se à duração média dos casos (dias, eixo Y direito) e o algarismo refere-se ao total de casos.....	42
Figura 10	Representação por ano e mês dos CCPE.....	43
Figura 11	Representação da Primeira Sequência Principal de Padrões de Circulação, obtida a partir da primeira coluna da matriz de componentes, <b>U</b> , calculada para a variável PNMM (hPa) dos CCPE.....	47
Figura 12	Primeira componente de carga que mostra a correlação entre a primeira componente obtida e as variáveis originais de entrada CCPE. São determinados os casos mais correlacionados maiores ao limiar de 70%. Destacam-se os 4 casos fora da	

	correlação esperada.....	48
Figura 13	Representação na sequência de dias, $k=3$ , $k=4$ , $k=5$ e $k=6$ , do comportamento da precipitação. Em cada estação meteorológica se representa um gráfico com ordenada que se refere à chuva acumulada em milímetros e abscissa que se refere aos 20 CCPE mais correlacionados.....	50
Figura 14	Composto dos casos mais correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de $\omega$ em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10}\text{s}^{-1}$ ) com sentido e magnitude do vento (m/s) em 500 hPa. (C) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa, (D) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}\text{ g/kg s}^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.....	53
Figura 15	Composto dos casos mais correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de $\omega$ ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS ( $-34^\circ$ e $-27^\circ$ latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).....	54
Figura 16	Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de $\omega$ em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10}\text{s}^{-1}$ ) com sentido e magnitude do vento (m/s) em	

	500 hPa.....	57
Figura 17	Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa, (B) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}$ g/kg s <sup>-1</sup> ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.....	58
Figura 18	Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5}$ s <sup>-1</sup> ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de ômega (Pa s <sup>-1</sup> ) dentro das latitudes do RS (-34° e -27° latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).....	59
Figura 19	Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mcp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas (Pa s <sup>-1</sup> ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10}$ s <sup>-1</sup> ) com sentido e magnitude do vento (m/s) em 500 hPa.....	61
Figura 20	Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa. (B) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}$ g/kg s <sup>-1</sup> ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.....	62



Figura 21	Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de ômega ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS ( $-34^\circ$ e $-27^\circ$ latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).....	63
Figura 22	Composto dos casos menos correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa.....	64
Figura 23	Mapas significativos do caso mais intenso. (RS fica dentro do retângulo). Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa.....	67
Figura 24	Mapas significativos do caso mais intenso (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa. (B) Divergência ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (C) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4} \text{ g/kg s}^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.....	68
Figura 25	Mapas significativos do caso mais intenso. Média de ômega ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS ( $-34^\circ$ e $-27^\circ$ latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).....	69
Figura 26	Representação (%) dos principais danos registrados dos CCPE...	70

### **Lista de tabelas**

Tabela 1	Coordenadas, latitude, longitude e altitude das 18 estações do estado do RS com dados de precipitação (2004-2013) que foram utilizados no trabalho.....	28
Tabela 2	CCPE em ordem cronológica com sua Persistência (dias), Média dos Acumulados (mm) nas 5 estações, Abrangência (Estações Meteorológicas) e tipo de sistema meteorológico que predomina	40
Tabela 3	Distribuição da variância explicada e acumulada (%) para as 24 PSP calculadas.....	44

### **Lista de abreviaturas e siglas**

ACP	Análise de Componentes Principais
CCPE	Casos de Chuva Persistente Extrema
ENOS	El Niño Oscilação do Sul
LI	Linhas de Instabilidade
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NTA-SSTA	Anomalias da Temperatura Superficial do Mar no Atlântico Tropical Norte
PNMM	Campos de Pressão ao Nível Médio do Mar
PSP	Padrões de Sequência Principais
RS	Rio Grande do Sul
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SF	Sistemas Frontais
JBN	Jato de Baixos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## Sumário

1- Introdução .....	17
2 -Revisão de Literatura .....	20
2.1- Sistemas Meteorológicos que afetam o RS.....	20
2.2- Padrões de Circulação de Eventos de Chuva.....	24
3- Metodologia.....	28
3.1- Seleção dos Casos de Chuva Persistente Extrema.....	29
3.2 - Obtenção de Padrões de Circulação Atmosféricos para os CCPE.....	31
4- Resultados e Discussões .....	35
4.1- Seleção de Casos.....	35
4.1.1- Filtragens dos Casos a partir das Características da Chuva (Duração- Acumulado- Abrangência).....	35
4.2- Padrões atmosféricos.....	43
4.2.1- Obtenção das PSP.....	44
4.2.2- Mapas da PSP mais significativa.....	45
4.2.3- Comportamento da Precipitação e Análise Sinótica dos Compostos.....	49
4.2.4- Análise sinótica do evento de chuva persistente mais intenso.....	64
4.3- Registro dos Principais Danos Relacionados aos CCPE.....	69

Conclusões.....	71
Referências.....	73

## **Introdução**

“A variabilidade e as mudanças do clima se apresentam como fatores de pressão aos processos de tomada de decisão da civilização atual e futura”. O desenvolvimento sustentável em longo prazo aplica-se ao desenvolvimento socioeconômico dos países, fruto dos trabalhos da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento de Nações Unidas (ONU, 2005). Prever as condições que podem resultar em desastres ambientais extremos (inundações, deslizamentos de terra, secas, tempestades elétricas, e fortes ventos), com várias e, muitas vezes graves consequências à sociedade humana, é um dos grandes desafios científicos dos dias de hoje.

As variações atmosféricas, em relação à variabilidade do clima, vêm se manifestando com um maior número de fenômenos meteorológicos extremos de precipitação (ONU, 2005; TEBALDI et al., 2006; MARENGO et al., 2007, TEDESCHI et al., 2014). Estas variações podem ser divididas em diferentes escalas, por exemplo, interdecadal, interanual e intrassazonal, sendo bem diferente a intensidade e duração da precipitação dos fenômenos em relação da escala em que estes atuem (NASCIMENTO; VITORINO, 2012).

Desastres ambientais relacionados com as chuvas, inundações e deslizamentos de terra podem ocorrer, por exemplo, devido a eventos meteorológicos que (i) geram uma quantidade de água em superfície em pouco tempo, não dando condições aos sistemas de drenagem naturais ou artificiais de escoarem a água precipitada (chuvas intensas), ou (ii) perduram por prolongados períodos de tempo, levando a um acumulado de chuva expressivo, mas que deixam o solo com um volume de água, impedindo que o mesmo tenha tempo de drenar a mesma (chuvas persistentes).

Nos últimos anos, o Brasil vem sofrendo com diversos destes desastres ambientais em diferentes épocas do ano (GRIMM, 2009), para os quais a causa pode ser atribuída, em sua grande maioria, aos fenômenos meteorológicos ou extremos climáticos como chuva intensa, chuva prolongada, ventos intensos, que por sua vez, levam aos desastres ou eventos citados anteriormente.

Dentro da região sul do Brasil o estado do Rio Grande do Sul (RS) tem um forte papel na economia com grande parte da sua atividade baseada na agricultura e pecuária. Segundo a Defesa Civil do RS no seu site, [www.defesacivil.rs.gov.br](http://www.defesacivil.rs.gov.br), o RS vem sofrendo perdas importantes em suas produções agrícolas, pela influência de eventos meteorológicos extremos, como por exemplo, secas prolongadas, chuvas prolongadas, granizo e ventos intensos.

Segundo informações do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e a Defesa Civil do RS tem-se referência de um período de chuva persistente acontecido no mês de novembro de 2009, quando foram registrados entre a primeira e terceira semana desse mês os maiores acumulados da chuva continua por dias, dentro da serie histórica desde 1909, superando os 100 mm em varias cidades do RS. Os acumulados de chuva em algumas cidades do estado apresentaram mais de 400% da média para esse mês, em duas delas, Bagé e São Luiz Gonzaga, choveu 549% e 501% em relação a essa média respectivamente. Os danos à rede de infraestrutura do Rio Grande do Sul foram bilionários, estimados em 3,5 bilhões de reais, envolvendo estruturas de energia, agricultura, prédios públicos e residências particulares que tiveram de ser socorridas pelo governo. Foram 66 cidades em situação de emergência e cerca de 20 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas em função da chuva.

Uma das tarefas de hoje em dia, é aprofundar e desenvolver investigações sobre fenômenos meteorológicos extremos relacionados às chuvas persistentes, pois, para esses eventos, dúvidas sobre as causas de seu início e como perduram os mesmos no tempo e espaço, continuam em aberto. Existe uma dificuldade na hora de mensurar a abrangência com a duração desses sistemas meteorológicos e com isso, uma maior necessidade de estudar estes eventos extremos de precipitação, a favor de unir conhecimentos estatístico-observacional da atmosfera (MELO et al., 2006). Planejar assim, um sistema de alerta que preveja desastres

relacionados às chuvas persistentes extremas, é importante, reduzindo os riscos e impactos ao dar uma maior informação para a população, principalmente, pela fragilidade dos grandes centros urbanos.

Este trabalho tem por objetivo geral fazer um estudo de eventos extremos de chuva persistente, obtendo padrões de circulação atmosférica em escala sinótica e a evolução temporal desses padrões para os eventos identificados no período de 2004 a 2013 no estado do Rio Grande do Sul. Como objetivos específicos a serem alcançados ao longo da execução do estudo, se têm (1) definir eventos extremos de chuva persistente por meio da sua distribuição estatística; (2) identificar tendências e preferências de ocorrência ao longo do período estudado; (3) encontrar padrões de circulação atmosférica em escala sinótica, bem como a sua evolução temporal e (4) caracterizar o ambiente de escala sinótica, associado aos eventos no tempo e no espaço.



## Revisão de Literatura

### 2.1- Sistemas Meteorológicos que afetam o RS

América do Sul é afetada por sistemas atmosféricos de escala sinótica (figura 1), que são influenciados tanto por fatores associados à circulação da grande escala quanto às circulações locais, ambos de origem tropical ou extratropical, podendo produzir na região Sul do Brasil eventos de chuvas intensas e persistentes, observadas de forma homogênea durante todo o ano (REBOITA et al., 2010).

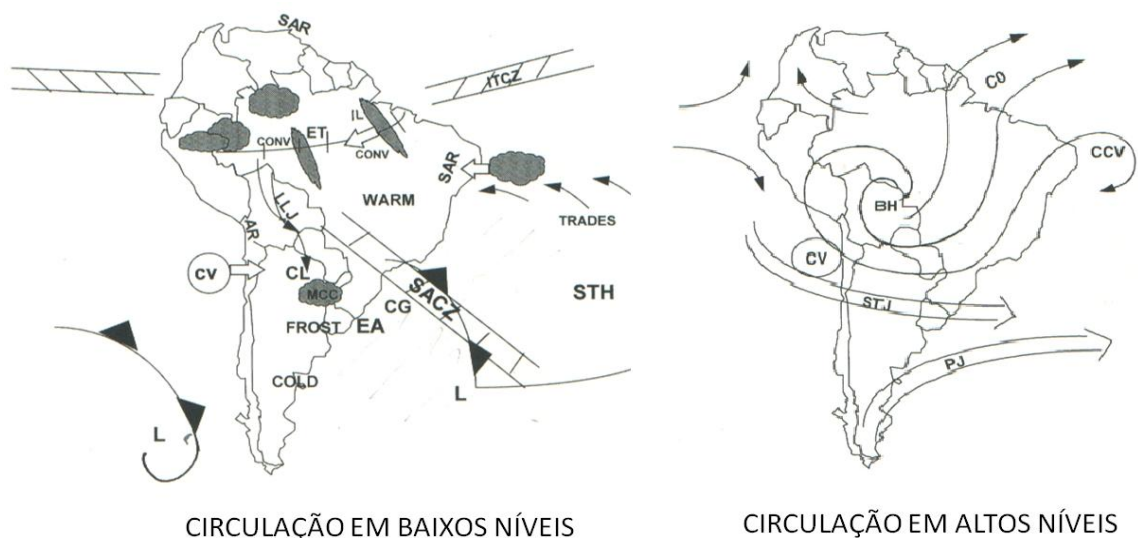


Figura 1- Representação dos sistemas atuantes na América do Sul em baixos e altos níveis.

CL=Baixa de Chaco, LLJ= Jato de Baixos Níveis (JBN), ET= Baixa Equatorial, AR= Regiões Áridas, SAR= Regiões Semiáridas, MCC= Sistemas Convectivos de Mesoescala, CONV= Atividade Convectiva, CG= Ciclogênese, STH= Alta Subtropical, EA= Anticiclone. Extratropical, L= Centro de Baixas Pressões, CV= Vórtice Ciclônico, BH= Alta da Bolívia, CCV= Vórtice de Núcleo Frio (VCAN tipo Palmer do NE de Brasil), CO= Escoamento de Cirrus, STJ= Jato Subtropical, PJ= Jato Polar.

Fonte: Adaptado de SATYAMURTY et al., 1998.

Segundo Mo e Berbery (2011), existe uma influência do evento El Niño Oscilação do Sul (ENOS), como fenômeno da grande escala, sobre a quantidade e persistência da chuva, principalmente durante o outono e a primavera no sul brasileiro. Segundo estes autores, o ENOS e as Anomalias da Temperatura Superficial do Mar no Atlântico Tropical Norte (NTA-SSTA), têm influência sobre a persistência extrema de eventos em toda América do Sul, determinando os comportamentos das secas e os períodos de umidade persistentes. Quando no oceano Pacífico se tem temperaturas mais quentes e sobre o Atlântico temperaturas mais frias, secas são observadas ao norte da América do Sul e períodos de umidade persistente são determinados na região sul do Brasil. As mudanças nos padrões são regionais e não tão intensas quando ambos oceanos são quentes ou frios ao mesmo tempo. São mais afetadas pelo ENOS as épocas da primavera e começo do verão (outubro, novembro e dezembro), assim como final de outono e começo do inverno (abril, maio e junho), com registros de eventos extremos de precipitação por toda América do Sul (TEDESCHI et al., 2014).

Os bloqueios atmosféricos são outro tipo de sistema que podem causar precipitações intensas e persistentes no sul do Brasil. A sua localização pode determinar a persistência de um sistema causador de chuvas. Por exemplo, com a presença de um anticiclone estacionário no oceano Atlântico ou no oceano Pacífico, se tem pouco ou nenhum movimento dos sistemas de chuva atuantes no momento sobre o sul brasileiro. Podem-se registrar assim, acumulados de chuva por várias horas ou dias na região de estudo. (GRIMM et al., 2000; CLIMANÁLISE, 2001).

Um fenômeno de escala sinótica que pode ter influência no RS é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que em união ao Jato em altos níveis e a partir dos sistemas frontais com caráter estacionário sobre o sudeste do Brasil, pode influenciar a formação de chuvas persistentes que perduram por vários dias nessa região, causando um efeito inverso no RS. Ou seja, quando a ZCAS se manifesta sobre a região sudeste do Brasil, o estado do RS tende a registrar períodos prolongados sem chuva. A ZCAS depende da entrada de calor e umidade do oceano Atlântico para o interior do Brasil e da região amazônica para o sudeste da América do Sul (QUADRO, 1994).

Algumas características sinóticas que afetam o sul brasileiro em relação às variáveis pressão, vento e precipitação, são descritas a seguir:

No verão (janeiro), um centro de baixa pressão continental desenvolve-se sobre a região do Chaco e estende-se para leste, e o centro de alta pressão sobre o Atlântico é deslocado para leste, conseqüentemente, a sua circulação não penetra muito o continente. No inverno (julho), o centro de baixa pressão continental é fraco, e a alta do Atlântico Sul estende-se sobre o continente. Em relação à direção e à intensidade do vento, se tem no verão, a formação de uma corrente em jato de baixos níveis que aumenta o transporte de umidade desde o norte para o sul do Brasil e, associado a esta configuração, maior incidência de chuvas nessa região. Os ventos na alta e média troposfera são predominantes de oeste, atingindo o sudeste e centro do Brasil, restringindo-se no verão ao extremo sul, pois se estabelece sobre grande parte do continente uma circulação anticiclônica, a Alta da Bolívia. Nas estações de transição o jato subtropical de altos níveis está centrado sobre o Sul do Brasil e nordeste da Argentina, o que influencia a precipitação mais intensa na região em relação a sistemas de ciclo de vida curto, Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (GRIMM, 2009).

O clima do sul do Brasil, não possui sazonalidade destacada em relação ao comportamento pluviométrico, mas apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação, devido principalmente a seu relevo acidentado e na transição entre os trópicos e as latitudes meias, portanto, existe a possibilidade de ocorrer chuvas extremas em qualquer época do ano (RAO; HADA, 1990; GRIMM et al., 2000; BARBIERI, 2005).

Em relação à variabilidade anual, chove mais na metade norte do estado (norte da latitude 30° sul) com totais de até 1500 mm. Cidades ao sul do RS como Bagé, Rio Grande e Santa Vitoria do Palmar, apresentam os menores acumulados totais de precipitação. Por outro lado, cidades que ficam no norte- nordeste como São Luiz Gonzaga, Passo Fundo, Iraí, Bom Jesus e Caxias do Sul, apresentam os maiores acumulados totais de precipitação, com maior incidência no verão, de sistemas frontais estacionários que produzem chuvas convectivas e SCM que favorecem a ocorrência de temporais com chuvas fortes em curto período de tempo. (INMET; CLIMANÁLISE, 2001).

Durante o inverno chove mais no litoral e no centro-sul do RS, sendo responsáveis pela pluviosidade os sistemas frontais (ANDRADE, 2005). No outono chove mais no sudoeste do estado com influência de frentes frias que ficam estacionárias (BRITTO et al., 2006). Durante o verão, com maior aquecimento da superfície, ocorre grande aporte de umidade dentro do continente, que em associação com o sistema de monção da América do Sul produz maior número de SCM, causando as condições de tempo mais adversas em todo RS, por exemplo, (enchentes, granizo, rajadas de ventos descargas elétricas atmosféricas). Na primavera os SCM formam-se no período noturno no RS, no qual apresentam um máximo de convecção com intensa precipitação, sendo importante na distribuição da precipitação no norte e nordeste do estado. (RASERA; CAMPOS, 2013).

Nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, há um aumento na quantidade e no número de dias contínuos com chuva, principalmente durante o outono e a primavera. O número e a intensidade destes eventos extremos mostram uma discreta tendência de aumento, com periodicidade de 3, 9-11 e 18 anos encontradas nas séries de chuva anual desde 1930, que sugerem uma associação com fenômenos naturais, como o Ciclo Solar de 11 anos (MINUZZI; LOPEZ, 2014).

Este comportamento climatológico das chuvas espacial e temporalmente, depende dos fenômenos meteorológicos que atuam diretamente na região, além do relevo do estado. Segundo Andrade (2005) grande influência nas chuvas têm os sistemas frontais (SF) que desenvolvem linhas de instabilidade (LI) pré-frontais, com uma frequência de aproximadamente 4 eventos por mês durante o inverno. Estes SF se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e continuam para o nordeste, onde a partir deles se organizam sistemas no sul do RS com a maior umidade associada à ciclogênese, tendo assim uma importante influência nos acumulados de chuva, principalmente no período agosto-setembro-outubro.

Vários trabalhos, por exemplo, Severo (1994); Harnack et al. (1999); Teixeira e Satyamurty (2007); Lima et al. (2010); Moura et al. (2013), têm focado nos eventos extremos de curta duração, de algumas horas até um dia, para os quais padrões atmosféricos têm sido obtidos e os seus comportamentos analisados. Estes eventos extremos são cada vez mais preocupantes, especialmente pelos danos socioeconômicos decorrentes, a partir da existência de um aumento no número

destes fenômenos na região e projeções de aumento no futuro. Tal resultado tem ajudado aos meteorologistas na identificação desses padrões, levando a uma melhora das previsões dessas situações potenciais a desastres.

Entretanto, pouco se tem investigado a respeito de chuvas persistentes extremas. Por exemplo, Nunes e Da Silva (2013), mediante o uso da modelagem climática regional, estudaram no leste e norte do estado de Santa Catarina, a frequência de desastres naturais ocasionados por eventos extremos de precipitação nos últimos 60 anos. Os autores mostram uma climatologia na região, onde os maiores números de eventos têm ocorrido no verão e outono e os de maior intensidade e persistência no inverno, com uma tendência linear positiva que indica um aumento no número de eventos futuros. Outro estudo da chuva persistente (TUTTLE; DAVIS, 2006), verifica que nas estações quentes, os SCM persistem por mais de uma semana, causando a persistência da chuva com acumulados importantes. A partir de imagens de radar e análise de campos termodinâmicos, os autores correlacionaram a intensidade da precipitação em eventos convectivos, com a força do Jato de Baixos Níveis (JBN), e concluem que a chuva persistente tende a diminuir quanto mais fraco for o JBN, já que o mesmo faz que se tenha uma maior convergência, elevação, transporte de umidade e frontogênese.

## **2.2- Padrões de Circulação de Eventos de Chuva**

Um dos principais objetivos da meteorologia, especificamente, da climatologia sinótica, têm sido a obtenção e classificação de padrões de circulação atmosféricos (RICHTMAN, 1986; COMPAGNUCCI et al., 2001). Existe um crescente interesse na melhora da previsão do tempo, pela necessidade de prevenir-se das consequências dos fenômenos extremos de precipitação, que como antes mencionado, causam os maiores danos na população e economia. Padrões atmosféricos podem ser obtidos a partir do estudo das variáveis para um só caso, o qual fornece informações detalhadas sobre a evolução do ambiente atmosférico durante a ocorrência do evento significativo, ou pela composição de um conjunto de casos (compostos), o qual utiliza a informação coletiva de um conjunto de eventos associados a um

mesmo fenômeno atmosférico para conhecer o ambiente sinótico médio que contribuiu para a sua ocorrência (LIMA et al., 2010; TEIXEIRA, 2010).

O método Análise de Componentes Principais (ACP), como ferramenta estatística em desenvolvimento, foi amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento, especialmente, naquelas em que se têm um volume considerável de dados e por tanto aumenta a necessidade de conhecer a estrutura dos mesmos e suas inter-relações. A aplicação da ACP na climatologia sinótica, objetiva à obtenção de padrões atmosféricos e com a seleção dos casos mais correlacionados, mapas compostos das variáveis mais significativas (RICHMAN, 1986; COMPAGNUCCI et al., 2001; TEIXEIRA, 2010; MOURA et al., 2013; ESCOBAR, 2007, 2014; GONÇALVES, 2015).

Os modos em que se organizam os dados de entrada são discriminados por diferentes letras, por exemplo, *O*, *P*, *Q*, *R*, *S* ou *T*. Deles, o *S* e *T* são utilizados frequentemente para estudar uma variável observada no tempo e espaço. O modo *S* é muito usado para se obter uma regionalização das características fundamentais da evolução temporal de um parâmetro, podendo obter padrões de teleconexão (COMPAGNUCCI; RICHMAN, 2008). Por outro lado o modo *T* serve como base para técnicas de classificação. Segundo Compagnucci et al. (2001), este modo deve ser aplicado quando se quer determinar anomalias dos principais padrões espaciais de uma variável, agrupando campos atmosféricos com similar estrutura espacial em diferentes instantes de tempo. Vários trabalhos mostram a vantagem e utilidades desse modo da ACP para obter padrões de circulação atmosféricos (HUTH, 1996; DE; MAZUMDAR, 1999; JACOBET et al., 2003; TEIXEIRA, 2010; ESCOBAR, 2007, 2014; GONÇALVES, 2015).

As características médias que fornecem os compostos dos padrões de circulação atmosférica, com o uso da simples ACP-T, não são suficientes para explicar a variabilidade da circulação (baixa, média e alta troposfera) associada à ocorrência por dias dos eventos extremos. Para obter uma correta compreensão do desenvolvimento dos sistemas atmosféricos (ciclogênese, anticiclogênese, comportamento, evolução dinâmica, dissipação, etc.) é importante, ter uma ferramenta mais específica. Essa nova ferramenta deve alcançar uma ampla série de processos, compreendendo desde desenvolvimentos diários, mensais, anuais ou

flutuações climáticas e suas transformações. A ferramenta Padrões de Sequência Principais (PSP), como extensão da ACP-T, representa padrões em sequências das situações sinóticas mais frequentes resolvendo o problema antes descrito. A técnica é valiosa para o estudo de um grande número de evoluções atmosféricas, compreendendo a variabilidade da circulação atmosférica com as causas iniciais e de manutenção em cada tipo de evento. PSP pode levar ao consequente melhoramento dos conhecimentos da meteorologia operacional na previsão do tempo, neste estudo, das chuvas persistentes. (RICHMAN, 1986; COMPAGNUCCI et al., 2001).

Compagnucci et al. (2001) estudaram a evolução dos sistemas atmosféricos por meio da PSP, neste caso para campos de altura geopotencial em 1000 hPa para o ano de 1997. Podem-se observar na figura 2 os padrões de circulação obtidos por esses autores. A figura 2 (a), com a tradicional ACP em modo *T*, exibe padrões independentes que ocorrem em qualquer ordem no período analisado; os primeiros três componentes que descrevem mais dos 80 % da variância total dos dados. A figura 2 (b) exibe um PSP que mostra a evolução mais frequente dos sistemas, obtendo uma melhor descrição da variável selecionada ao comparar os componentes obtidos com mapas dos dias reais mais correlacionados em sequência. Os autores concluíram que existe similaridade entre os resultados da ACP em modo *T* e aquelas da PSP, mas se com o primeiro isolam subgrupos de campos espaciais semelhantes com o segundo podem separar subgrupos de sequência espaciais de campos que mostram similitude nos desenvolvimentos e evoluções dos padrões do fenômeno que aconteceu.

Escobar (2007) utilizou a PSP para campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) e de altura geopotencial em 500 hPa, obtendo os padrões associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. Moura et al. (2013) obtiveram padrões de circulação em superfície e altitude, associados a eventos de chuva intensa no Rio de Janeiro com a PSP em modo *T*. Escobar (2014) obteve os PSP de campos de pressão em superfície e de altura geopotencial em 500 hPa para América do Sul, definindo eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais para um mês específico.

Gonçalves (2015) como o uso da PSP, encontrou como padrão sinótico para as chuvas persistentes no sudeste do Brasil, a passagem pela região, de sistemas frontais, assim como, o fortalecimento dos anticiclones do Pacífico e Atlântico. O autor também encontrou a formação de um sistema de bloqueio no Atlântico, relacionado à pouca mobilidade do sistema causador da precipitação, com uma região de forte umidade (Zona de Convergência de Umidade) no centro do continente, que favorece a manutenção da chuva por dias nessa região do Brasil.

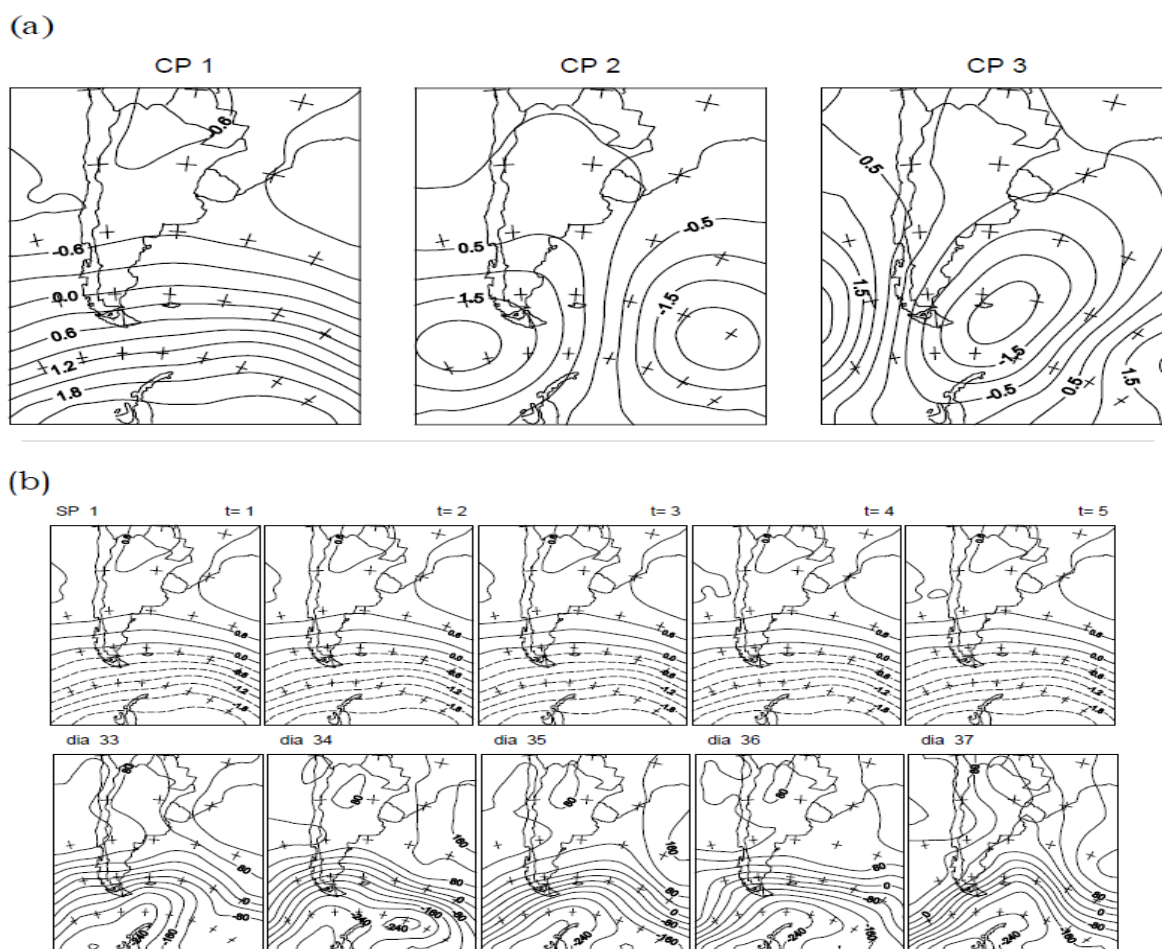


Figura 2- (a) Exemplo das primeiras 3 componentes principais obtidas por Compagnucci et al. (2001) a partir da aplicação da ACP-T para uma amostra de dados, obtendo a partir das 3 primeiras colunas da matriz de componentes, 3 mapas com anomalias da variável altura geopotencial em 1000 hPa. Anomalias negativas ou positivas estão relacionadas às regiões de baixa ou alta pressão respectivamente que existem. (b) Para a mesma amostra de dados a aplicação da PSP, que obtêm a partir da primeira coluna da matriz de componentes, a primeira sequência principal de 5 mapas com anomalias da altura geopotencial em 1000 hPa, podendo ser analisados com sua sequência real em dias mais correlacionados.



## Metodologia

Para o estudo foram utilizados dados diários de precipitação, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET por meio do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, para 10 anos (2004-2013) de observação para o RS, tomando 18 estações meteorológicas bem distribuídas geograficamente por todo o estado. A tabela 1 apresenta as informações das estações a serem usadas, enquanto a figura 3 apresenta as suas localizações dentro do RS.

Tabela 1- Coordenadas, latitude, longitude e altitude das 18 estações do estado do RS com dados de precipitação (2004-2013) que foram utilizados no trabalho.

Cidade	Cod. OMM	Lat(°)	Lon(°)	Altitude(m)
BAGÉ	83980	-31.33	-54.1	242.31
BENTO GONCALVES	83941	-29.15	-51.51	640.00
BOM JESUS	83919	-28.66	-50.43	1047.50
CAXIAS DO SUL	83942	-29.16	-51.2	759.60
CRUZ ALTA	83912	-28.63	-53.6	472.50
ENCRUZILHADA DO SUL	83964	-30.53	-52.51	427.75
IRAI	83881	-27.18	-53.23	247.10
LAGOA VERMELHA	83916	-28.21	-51.5	840.00
PASSO FUNDO	83914	-28.21	-52.4	684.05
PELOTAS	83985	-31.78	-52.41	13.00
PORTO ALEGRE	83967	-30.05	-51.16	46.97
RIO GRANDE	83995	-32.03	-52.11	2.46
SANTA MARIA	83936	-29.7	-53.7	95.00
SANTA VITORIA DO PALMAR	83997	-33.51	-53.35	24.01
SANTANA DO LIVRAMENTO	83953	-30.83	-55.6	328.00
SÃO LUIZ GONZAGA	83907	-28.4	-55.01	245.11
TORRES	83948	-29.35	-49.73	4.66
URUGUAIANA	83927	-29.75	-57.08	62.31

Fonte: INMET

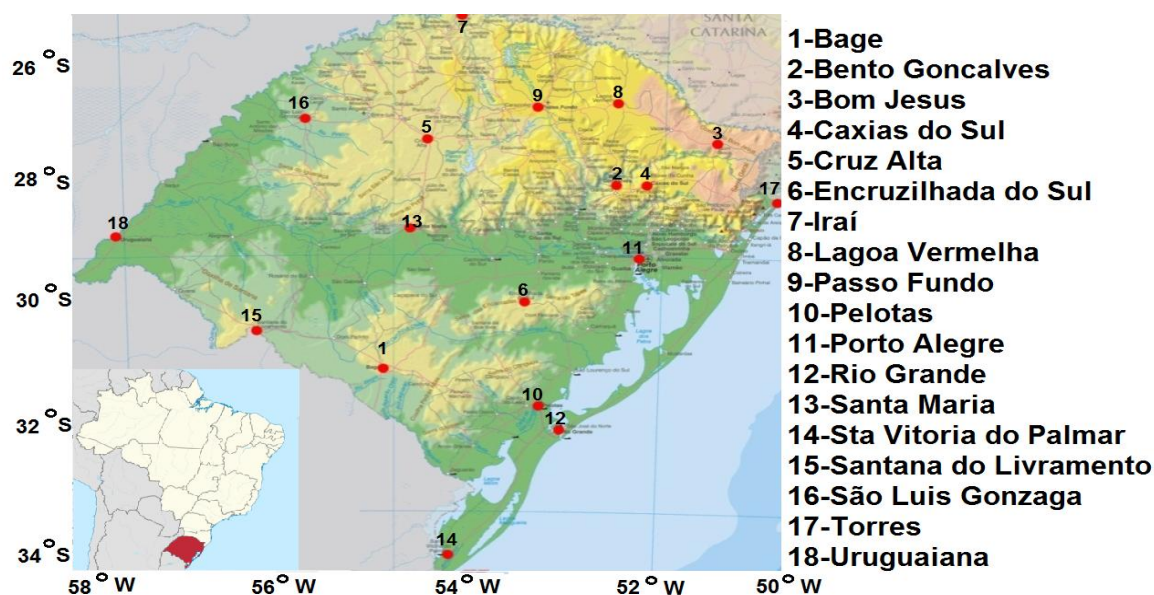


Figura 3- Representação das 18 estações meteorológicas no mapa do Rio Grande do Sul, com dados de precipitação (2004-2013) que foram utilizadas no trabalho. No lado esquerdo inferior se destaca a localização do RS dentro do Brasil.

Fonte: Adaptado do INMET.

A definição de um evento de chuva extrema é altamente subjetiva, podendo ser estabelecida levando-se em conta aspectos como intensidade, a quantidade total acumulada nos registros num certo intervalo de tempo e abrangência espacial, bem como quaisquer combinações destas características da chuva.

### 3.1- Seleção dos Casos de Chuva Persistente Extrema

Para a seleção dos casos de chuva persistente extrema, foram usadas três características da chuva: (i) duração, (ii) acumulado no período e (iii) abrangência espacial. Eventos de chuva com grande duração foram considerados aqui como persistentes, dessa forma, um evento extremo de chuva persistente foi todo o período de chuva que ocasionou um elevado acúmulo de precipitação, em um longo período de tempo e com uma extensa abrangência espacial. Neste estudo não foi feito nenhum procedimento de preenchimento de falhas de dados.

Para obter a primeira característica da chuva, em cada uma das 18 estações meteorológicas, foram contabilizados os dias com chuva superior a 1 mm, sendo organizados e agrupados estes dados em dias consecutivos de chuva. Uma contagem dessa sequência de dias foi obtida, gerando assim um conjunto de períodos de chuva contínua, que foram chamados casos de chuva persistente. Obtêm-se assim uma base de dados com os períodos ou casos de chuva persistente e seus acumulados durante os 10 anos de estudo. Foram selecionados os períodos com número de dias superior ao quantil 0.9 dos casos persistentes, fazendo testes iniciais com outros quantiles, para comprar que o escolhido foi o melhor pela quantidade total de dados que sem.

Da base de dados inicial foram obtidas as médias dos acumulados mensais da chuva em milímetros (mm) nos 10 anos de estudo. Faz-se assim uma média sazonal para cada estação meteorológica. Foram agrupados por estação do ano os casos de persistência extrema, obtidos como mencionado anteriormente, e deles foram selecionados os casos cujos acumulados superaram o 50% da média sazonal, sendo chamados de Casos de Chuva Persistente Extrema, obtendo-se a segunda característica da chuva.

Para a terceira característica associada aos Casos de Chuva Persistente Extrema se fez uma análise visual, com intenção de analisar a extensão do fenômeno que afetou às cidades do RS e a proximidade geográfica das cidades atingidas. Dessa forma, os casos deviam abranger, no mínimo, 5 estações meteorológicas (30% das estações em análise), com as duas características antes mencionadas. Obtendo, finalmente, durante os 10 anos de estudo os **Casos de Chuva Persistente Extrema (CCPE)**, com maior abrangência, intensidade e duração na região que produziram. Os CCPE foram analisados quanto à possibilidade de preferência de ocorrer em alguma estação do ano, bem como quanto ao tipo de sistema meteorológico predominante, a partir das imagens diárias de satélite, obtidas do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), [http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic](http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes/formulario.logic) e as cartas de análise sinótica para esses dias, fornecidas desde o ano 2006 até a data final deste estudo, pelo Serviço Meteorológico Marinho do Brasil, disponibilizadas em seu site, [www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm).

### 3.2- Obtenção de Padrões de Circulação Atmosféricos para os CCPE

Selecionou-se uma sequência dias em cada um dos CCPE. Primeiramente selecionam-se 2 dias antes do início dos eventos, para analisar as condições que iniciaram os mesmos, tendo em conta que a chuva acumulada, é recolhida nas estações meteorológicas desde as 24 horas do dia antes à leitura e registro da mesma (desde as 12 UTC do dia anterior). Continua-se a sequência até chegar ao número de dias mínimos com persistência da chuva para os casos analisados. Tem-se assim a distribuição em dias que começa 48 horas antes de iniciar o registro da chuva persistente nas estações meteorológicas ( $k=1$ ), 24 horas antes do registro ( $k=2$ ), o início do caso registrado ou primeiro dia com chuva persistente ( $k=3$ )... até chegar ao número mínimo de dias calculado.

Foram usados os dados da Reanálise II do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), daqui em diante referido como RII-NCEP. Esses dados contêm informações de temperatura, umidade, vento, ômega, altura geopotencial e pressão em diferentes níveis atmosféricos que possuem uma abrangência global, com espaçamento de grade de  $2,5^\circ$  de latitude por  $2,5^\circ$  de longitude e espaçamento temporal de 6 horas.

A identificação de padrões sinóticos foi usada com o objetivo de obter uma representação da circulação atmosférica associada aos CCPE, de maneira similar a como foi obtida nos trabalhos antes referidos e seus resultados mostrados na figura 2. Para determinar estes padrões, foi feita uma seleção dos dados da variável PNMM das 12 UTC para os dias em sequência selecionados, esta é uma das variáveis mais representativas neste tipo de estudo (COMPAGNUCCI et al., 2001).

A técnica estatística multivariada ACP foi aplicada, obtendo uma reprodução e classificação sintetizada dos padrões atmosféricos de circulação, com as frequências e períodos de tempo neles dominantes (RICHMAN, 1986). Os PSP com matriz de correlação em Modo-T foram obtidos usando a aproximação de Compagnucci et al. (2001). A evolução temporal dos padrões de circulação determina com facilidade os períodos dos eventos que perduram por dias, além disso, analisa a trajetória e comportamento dos sistemas sinóticos que causaram e mantiveram os casos.

Os PSP procuram expressar uma matriz de dados  $X$ , onde cada coluna encontra-se formada por um subconjunto ordenado de campos e cada uma das sucessivas linhas estão constituídas por um subconjunto de  $k$  campos defasados no tempo (representação da variação temporal em dias dos CCPE). Tem-se assim ( $n$  colunas = número de CCPE) e número de linhas de entrada ( $mk$ ) em relação à sequência de pontos de grade da PNMM sobre a região,  $m= 41*37$ , durante os  $k=6$  dias seleccionados. Finalmente nossa matriz vai ter dimensões  $(mk) * (n)$ , como se mostra na figura 4.

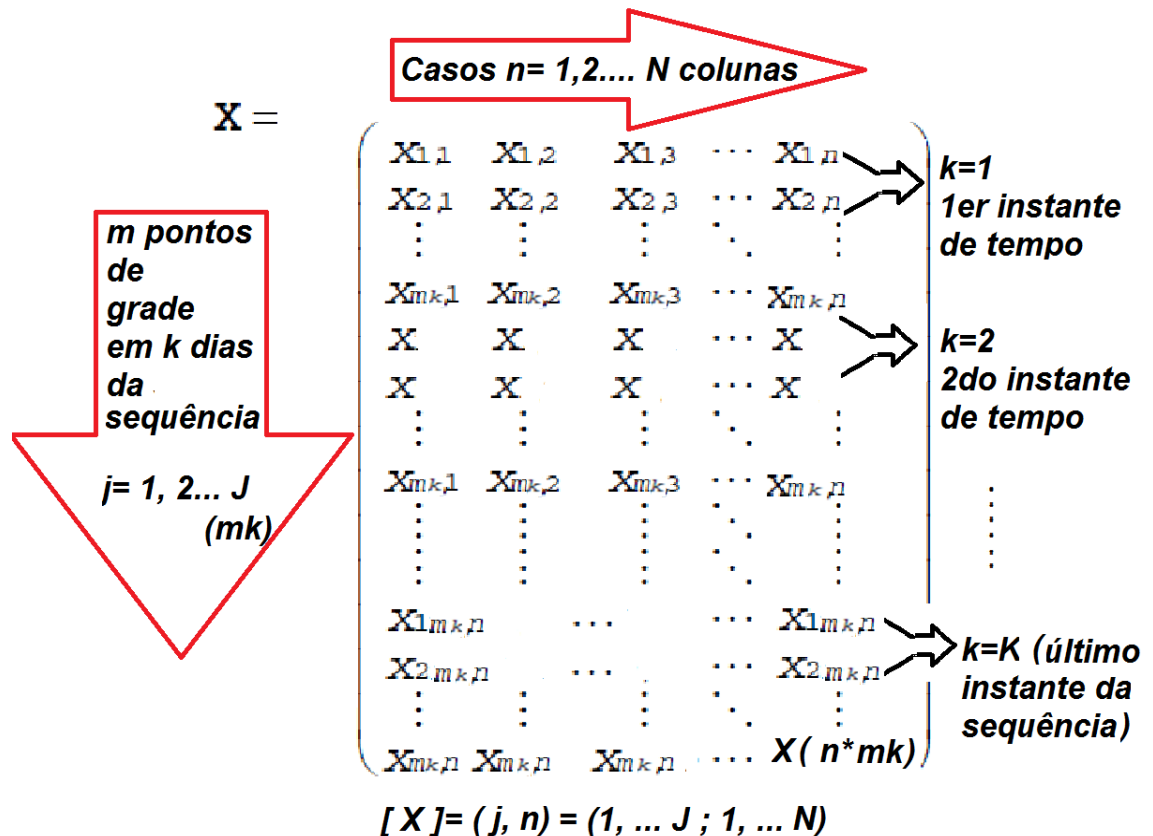


Figura 4- Representação da matriz  $X$  de dados de entrada para o cálculo das PSP (Casos e os respectivos pontos de grades da PNMM nos dias seleccionados).

Aqui, a matriz de correlação associada às anomalias padronizadas de  $\mathbf{X}$  é usada, dando a mesma importância a cada ponto de grade por separado, a mesma foi calculada:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}_s' \mathbf{X}_s \quad (3.1)$$

sendo  $\mathbf{X}_s'$  a trasposta da matriz  $\mathbf{X}_s$  de anomalias padronizada por colunas. Obtêm-se assim a correlação entre a  $n$ -ésima e  $j$ -ésima sequência de entrada. Da matriz  $\mathbf{R}$ , autovalores foram obtidos,  $\boldsymbol{\lambda}$ , que dão a variância representada por cada PSP, e autovetores,  $\mathbf{E}$ , os vetores direcionais que giram a nuvens de dados de  $\mathbf{X}$ , na direção dos eixos principais, sobre os que se definem as PSP.

A partir do cálculo de  $\mathbf{R}$ , se obtêm a matriz de componentes principais na forma:

$$\mathbf{U} = \mathbf{X}_s \mathbf{E}' \quad (3.2)$$

sendo  $\mathbf{X}_s$  a matriz padronizada por colunas e  $\mathbf{E}'$  trasposta da matriz de autovetores. Como resultado, as colunas da nova matriz  $\mathbf{U}$  são as novas variáveis padronizadas, que representam os PSP de  $k$  campos espaciais. Os PSP podem ser representados como campos espaciais e as colunas da matriz de autovetores,  $\mathbf{E}$ , fornecem as séries temporais. Para o cálculo em porcentagem das variâncias totais representadas por a  $j$ -ésima sequência principal usa-se:

$$V = (\lambda_j / \sum \lambda) 100 \quad (3.3)$$

sendo  $\lambda_j$  cada autovalor obtido (RICHMAN, 1986; COMPAGNUCCI et al., 2001). De acordo com Richman (1986), diversos testes falam sobre o número de componentes retidos, para sua representação final. Neste trabalho, foi aplicado para escolher as componentes principais mais significativas, o teste de truncamento a partir do erro de amostragem dos autovalores (NORTH et al., 1982). Para maiores detalhes a respeito das aplicações e da matemática desta técnica, podem-se procurar os estudos das referências citadas neste trabalho.

Foram determinadas as correlações das situações meteorológicas reais, com características espaciais dominantes, a partir dos padrões de sequência obtidos, mediante o cálculo da matriz **F**:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E}_k (\lambda_j)^{1/2} \quad (3.4)$$

sendo  $\mathbf{E}_k$  a coluna selecionada da matriz de autovetores e  $\lambda_j$  seu correspondente autovalor. Caracteriza-se assim a representatividade dos padrões com o ambiente de escala sinótica real associada aos eventos no tempo e espaço.

Este produto dos PSP, a partir da seleção dos CCPE mais correlacionados (maior 70 %), permite construir campos médios denominados compostos, das variáveis mais importantes em sequência de dias, com os dados do NCEP. Os compostos feitos foram mapas com a PNMM que ao mesmo tempo incluem à altura geopotencial com isolinhas separadas a cada 60 metros de geopotencial, representando camadas separadas a 3° de temperatura, e valores negativos de ômega em 500 hPa; advecção da vorticidade com sentido e magnitude do vento em 500 hPa; a temperatura com a umidade específica e sentido e magnitude do vento em 850 hPa; a divergência do fluxo de umidade com linhas de corrente do vento em 850 hPa; divergência e linhas de corrente do vento em 200 hPa e por último a média dentro das latitudes do estado do RS de ômega, para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa. Esses compostos fornecem mapas com os padrões atmosféricos reais que ajudarão a identificar o início e manutenção por dias da chuva persistente, que servirão para auxiliar a previsão de novos eventos de CCPE.

Os danos e as consequências relacionados aos CCPE, ao longo do período estudado, foram relacionados com informações do INMET e a defesa civil do RS, disponibilizadas em seu site, [www.defesacivil.rs.gov.br](http://www.defesacivil.rs.gov.br). Esse site possui informações sobre os desastres e transtornos provocados por diversos fenômenos meteorológicos e não meteorológicos.

## **Resultados e Discussões**

### **4.1- Seleção de Casos**

Como parte da análise exploratória dos dados diários de precipitação para os 10 anos de estudo (2004-2013), organizaram-se tabelas com os dados de chuva diária as 12 UTC, acumulada em 24 horas para cada uma das estações meteorológicas que se têm no RS.

#### **4.1.1- Filtragem dos Casos a Partir das Características da Chuva (Duração-Acumulado- Abrangência)**

Foram obtidos para cada estação meteorológica os dias contínuos de chuva maiores de 1 milímetro, os mesmos ao serem agrupados são os primeiros casos que representam a primeira característica da chuva persistente (duração no tempo). Foram selecionados os casos que superaram o quantil 90 % da persistência em dias, obtendo aproximadamente até 35 casos em cada estação meteorológica, e de forma geral, que o mínimo de dias com chuva continua é de 4, variando o máximo em cada estação meteorológica. Na figura 5, a modo de exemplo, se mostra a primeira característica da chuva, com eventos ou casos que aconteceram na estação meteorológica de Torres. Como se pode observar, a maior concentração de casos fica com períodos de até 2 dias e com chuva acumulada menor que 50 mm. Foram selecionados, os casos com maior persistência em dias e seus respectivos acumulados, que são os menores em número e ficam na direita da linha vertical do gráfico.



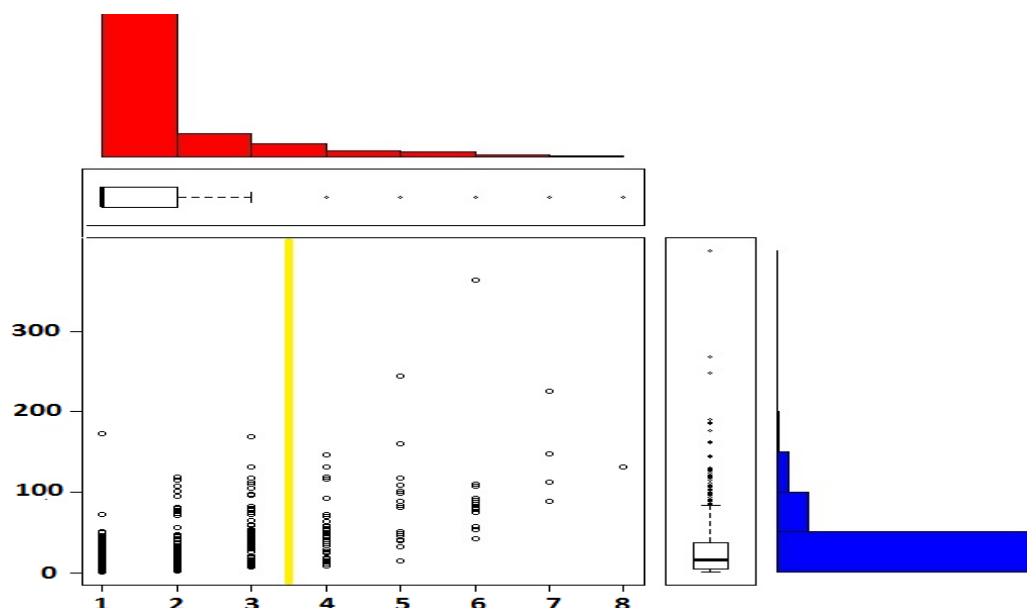


Figura 5- Representação, na Estação Meteorológica de Torres, da Primeira Característica da Chuva (Períodos com Persistência em Dias e seus Acumulados de Chuva em Milímetros). Ordenada refere-se à chuva acumulada em milímetros nos 10 anos para esta estação (com boxplot e histograma) e abscissa refere-se à duração em dias dos casos (com boxplot e histograma). Casos com maior persistência em dias e seus respectivos acumulados selecionados, ficam na direita da linha vertical do gráfico.

Gráficos como a figura 5 foram feitos para as 18 estações meteorológicas e especificamente, a estação meteorológica de Uruguaiana, alcançou a persistência de até 12 dias em fevereiro de 2007. Casos como esse, podem ter acontecido pela união de vários fenômenos meteorológicos, um após o outro no tempo, e por isso tantos dias com chuva.

Calculou-se a média da chuva acumulada (mm), para cada mês durante os 10 anos de estudo e com estas médias, se fez um acumulado médio sazonal para cada estação meteorológica (figura 6). As estações meteorológicas nessa figura 6 são representas em relação à posição geográfica das mesmas, como o mapa figura 3 da metodologia. Selecionam-se os casos de chuva persistente, cujos acumulados superaram o 50% da média sazonal, cumprindo com a condição de chuva extrema. Tem-se assim, o comportamento da média trimestral ou sazonal (verão, outono, inverno, e primavera) para cada uma das 18 estações meteorológicas.

A figura 6 mostra que no outono e verão, se têm a menor variabilidade e menores valores da chuva durante os 10 anos. Os maiores valores da chuva ficam

no inverno e na primavera, nesta última, se observam os extremos da chuva média calculada, como nas cidades de Santa Vitória do Palmar (mínima) e São Luis Gonzaga (máxima). Observa-se como as cidades de Rio Grande e Pelotas, registram poucos acumulados médios da chuva em todas as estações do ano. De forma geral, os maiores acumulados médios de chuva ocorrem nas cidades que ficam no centro-norte do estado, isso coincide com as referências antes descritas da climatologia do RS (INMET; CLIMANÁLISE 2001, 2006).

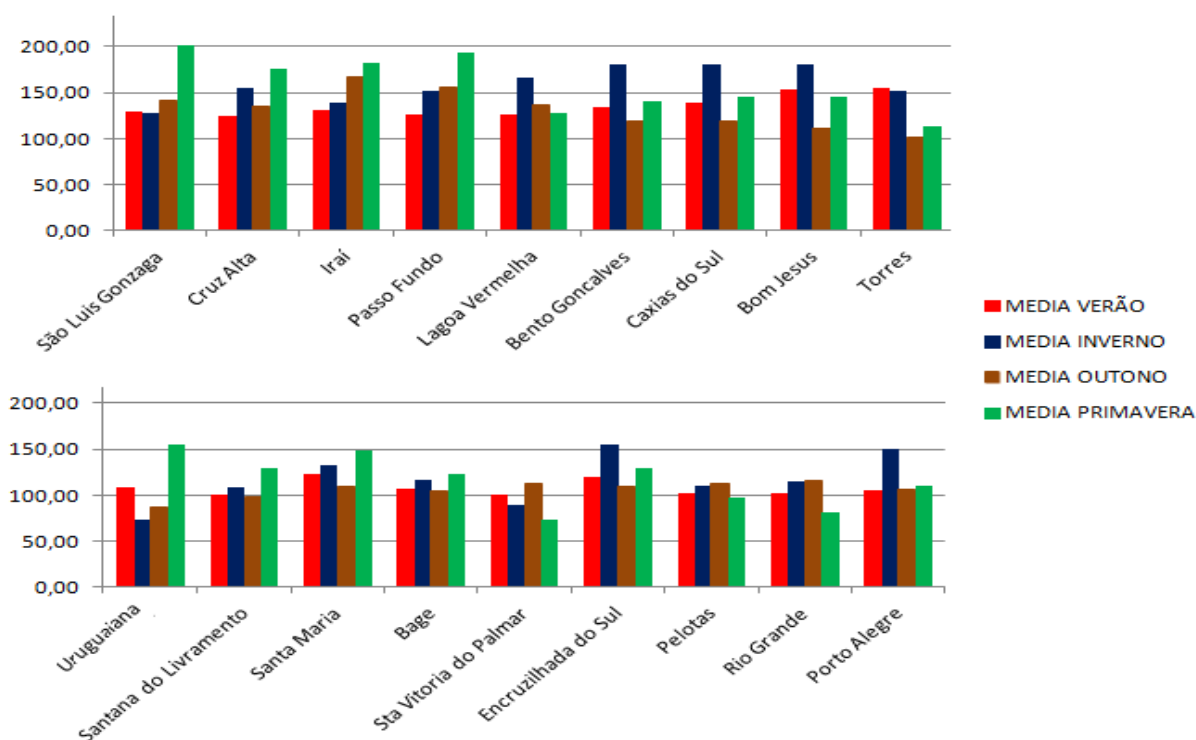


Figura 6- Representação da média sazonal nas estações meteorológicas, para a seleção de casos na Segunda Característica da Chuva (Acumulados Extremos). Ordenada refere-se à chuva média sazonal acumulada em milímetros para cada estação meteorológica.

A terceira característica de chuva pela qual estes novos casos foram filtrados, foi à abrangência espacial que apresentaram, mantendo os que mantiveram as duas primeiras características da chuva dentro do período e perduraram em mais de 5 estações meteorológicas, que representam mais de 30 % das 18 total que se tem.

No mapa da figura 7 se mostra um exemplo de como foi feito o procedimento de agrupamento dos casos por datas e como foi sua distribuição espacial dentro do

estado. Esta figura representa um dos casos que aconteceu no outono na cidade de Torres, o qual, ao ser unido com outros casos no mesmo período de tempo (datas), permitiu observar a persistência, o acumulado extremo e a abrangência da chuva em 5 estações meteorológicas do RS. Estas estações meteorológicas estão ressaltadas dentro da figura com uma pequena figura triangular. Nas bordas do mapa se tem uma extensão do comportamento dos acumulados da chuva (mm), em cada uma das 18 estações meteorológicas e para cada dia do período. Este caso foi o que alcançou o maior acumulado da chuva persistente extrema na cidade de Torres (maior que 300 mm durante 6 dias), dentre os casos antes selecionados.

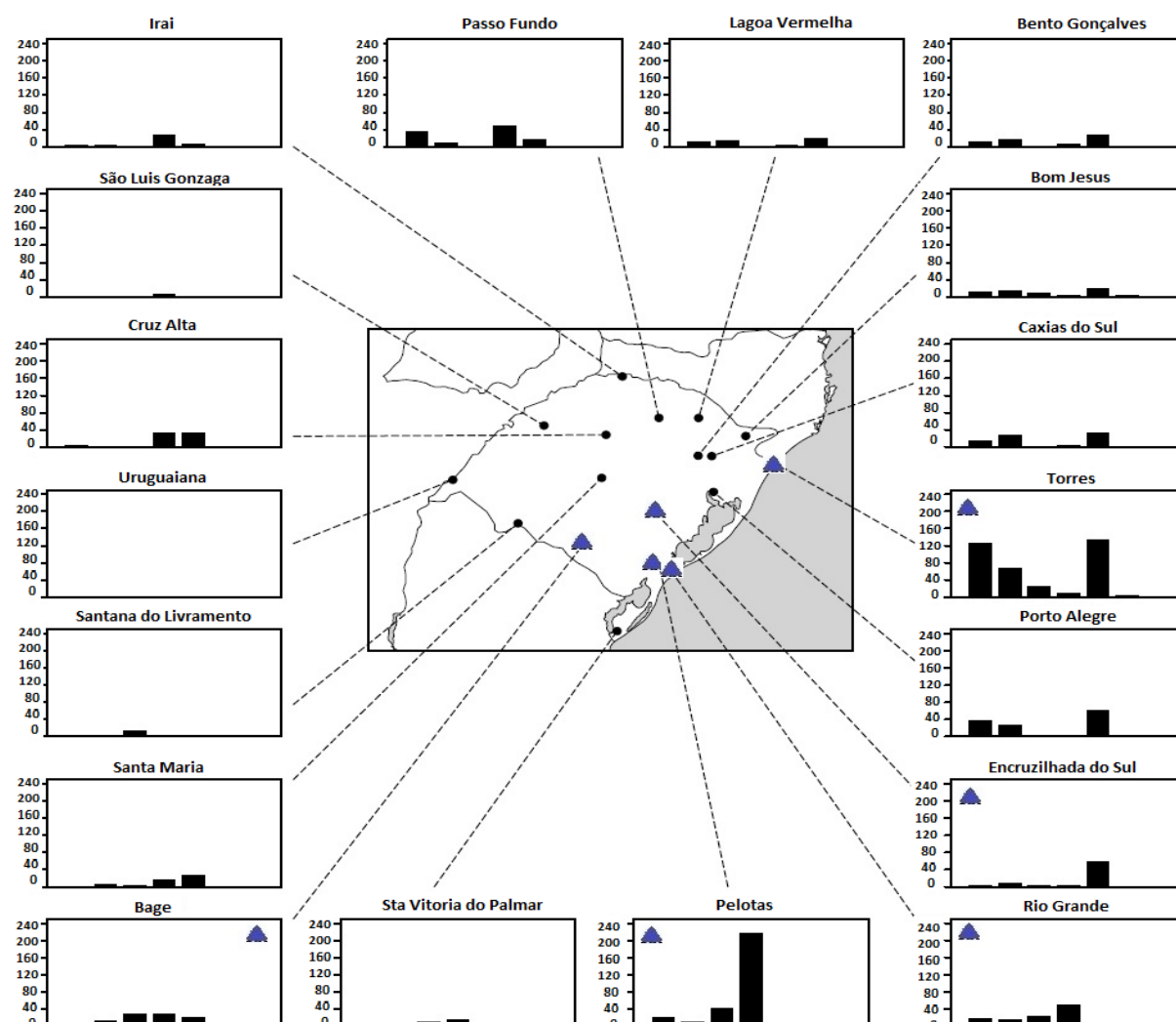


Figura 7- Representação da Terceira Característica da Chuva (Abrangência Espacial). Em cada estação meteorológica se representa um gráfico com ordenada que se refere à chuva acumulada em milímetros e abscissa que se refere à sua duração em dias.

Como se pode observar neste exemplo da figura 7, todos os casos que mantiveram a persistência e acumulados extremos em mais de 5 estações meteorológicas, ressaltadas com triângulos dentro do RS, foram os finalmente selecionados para a análise na segunda etapa do estudo. Um comportamento dos acumulados de chuva (mm) durante o período do caso é ampliado para as 18 estações meteorológicas que se têm no RS.

Mapas como o da figura 7 foram feitos separando os mesmos por estação do ano. Observa-se assim como nos casos que aconteceram no inverno, se agrupam na maioria, em forma linear (não mostrado), isso tem relação aos fenômenos meteorológicos que causam essas precipitações neste período do ano, como SF. Nos casos que aconteceram no verão, se agrupam na maioria, ao mesmo tempo ao norte como ao sul da região, representando os SCM típicos desta época do ano. Já para a primavera e outono se observam casos organizados linearmente e casos bem dispersos, sendo exemplo de estações de transição onde podem ocorrer tanto fenômenos de massa de ar quente como fria. Encontrou-se assim para o período de 2004-2013 os CCPE com maior abrangência, intensidade, duração e importância pelo efeito que produziram na região.

Os CCPE obtidos foram resumidos em ordem cronológica na tabela 2. Em relação à preferência dos casos pelas estações do ano, se observam como ocorreram 6 casos no verão, 4 no outono, 9 no inverno e 5 na primavera. O valor médio da abrangência dos casos indica que no verão e no outono aconteceram casos até em 6 cidades, na primavera até em 10 cidades e o máximo de até 11 cidades atingidas foi no inverno. Na tabela 2 se menciona o tipo de sistema meteorológico que predomina em cada um dos casos, na maioria, se observaram inter-relacionados mais de 2 sistemas da escala sinótica.

Ao fazer comparações com os estudos antes referidos sobre climatologia da chuva extrema no RS, em coincidência, se tem uma distribuição de ocorrência de eventos extremos por todo o ano, prevalecendo os SF e os SCM (RAO; HADA, 1990; GRIMM et al., 2000; BARBIERI, 2005). No verão e primavera predomina como sistema meteorológico os SCM, que alguns casos se retroalimentam por dias da umidade do oceano Atlântico, com a chegada ao RS de SF, comum nestas estações do ano (RASERA; CAMPOS 2009). No inverno e outono predomina a formação,

maiormente no litoral entre o norte do Uruguai e o sul do RS, de ciclones extratropicais quase estacionários, incidindo por dias com grande nebulosidade sobre a região, e em alguns casos, a ciclogênese associada aos mesmos, desenvolve SF e LI que mantém a chuva persistente sobre o estado, típico para estas épocas do ano (ANDRADE, 2005; BRITTO et al., 2006).

Tabela 2- CCPE em ordem cronológica com sua Persistência (dias), Média dos Acumulados (mm) nas 5 estações, Abrangência (Estações Meteorológicas) e tipo ou tipos de sistema meteorológico que predomina.

CCPE	Datas	Persistência Dias	Acumulado Médio	Abrangência Estações Met.	Tipo de Sistema Meteorológico Predominante
1	04-09/05/2004	6	187,24	5	ciclone extratropical - SF
2	11-20/06/2005	10	165,94	6	SF - SCM
3	14-18/10/2005	5	121,06	8	SF
4	21-26/01/2006	6	75,64	5	SF - SCM
5	20-25/02/2007	6	151,06	5	SF - SCM
6	07-11/07/2007	5	122,83	6	SF - SCM
7	16-20/08/2007	5	111,76	5	ciclone extratropical - SF
8	27/10-02/11/2007	7	112,78	9	SCM
9	28/02-05/03/2008	6	96,40	8	ciclone extratropical
10	22-27/10/2008	6	181,96	7	SF - SCM
11	06-10/08/2009	5	133,04	7	SF - SCM
12	07-13/09/2009	7	185,29	8	SF - SCM
13	03-09/11/2009	7	146,49	7	SF - SCM
14	18-25/11/2009	8	144,76	10	SCM
15	14-17/02/2010	4	94,30	5	SF
16	20-23/04/2010	4	100,95	6	SF - SCM
17	17-22/07/2010	6	114,06	7	ciclone extratropical - SF
18	31/08-05/09/2010	6	75,10	6	ciclone extratropical - SF
19	11-14/09/2010	4	80,48	6	ciclone extratropical - SF
20	24-30/03/2011	7	187,76	7	SF - SCM
21	17-26/06/2011	10	103,60	5	ciclone extratropical - SF
22	04-09/02/2012	6	104,94	5	ciclone extratropical - SF
23	23-27/08/2013	5	165,09	11	SF
24	20-25/09/2013	6	105,79	7	ciclone extratropical - SF

São observados na figura 8, os 24 casos finais com a persistência extrema (dias) e os acumulados médios de chuva extrema (mm). A maior quantidade de casos persistentes extremos possuem 5, 6 e até 7 dias contínuos da chuva, com acumulados médios extremos que vão de 50 até quase 200 mm.

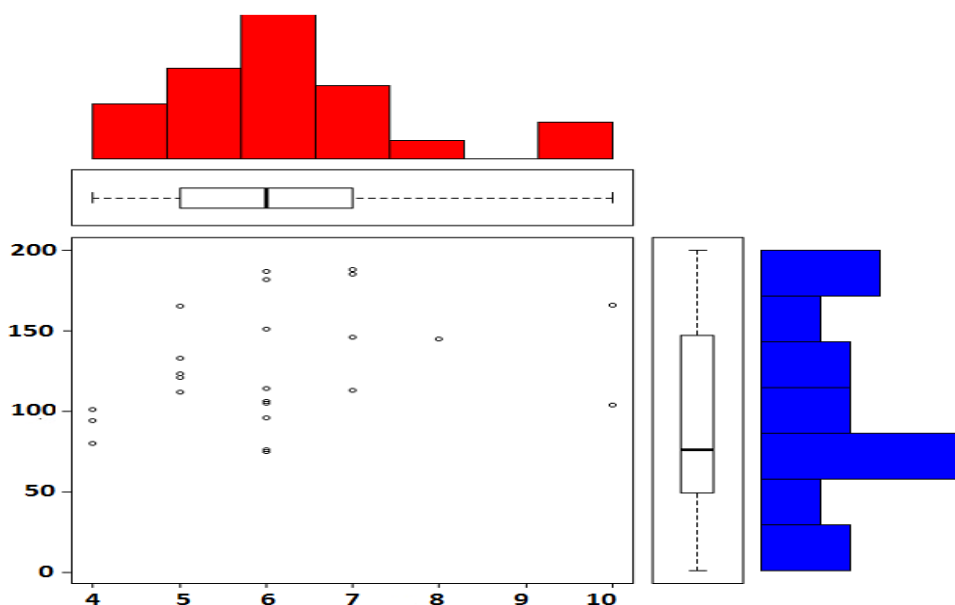


Figura 8- Representação dos CCPE. Ordenada refere-se à chuva acumulada média em milímetros nos casos (com boxplot e histograma) e abscissa refere-se à duração dos casos em dias (com boxplot e histograma)

Os resultados dos CCPE, antes descritos e resumidos na figura 9, mostram uma preferência com 9 casos de chuva persistente, na estação do inverno. Entretanto, esses casos possuem menores acumulados médios da chuva, em comparação com a primavera. A primavera e o outono se destacam em relação à maior persistência de dias com chuva e seus acumulados médios, tendo a primeira uma média de aproximadamente 141 mm e a segunda, 139 mm. Estas são estações de transição, que como descreve Grimm (2009), nas mesmas podem acontecer fenômenos meteorológicos tanto de verão como de inverno, existindo condições físicas na atmosfera para manter esses dias com chuva. Especificamente, no outono, aconteceu o caso de chuva mais extrema identificado neste estudo, ocorrido na cidade de Torres. O verão, apesar de apresentar casos com duração média similar às demais estações, tem o menor acumulado médio, aproximadamente

118 mm. Para uma região de Santa Catarina, por exemplo, Nunes e Da Silva (2013) indicam que a maior quantidade de eventos extremos foi observada nas estações do verão e outono, e que os casos de maior intensidade ocorreram no inverno.

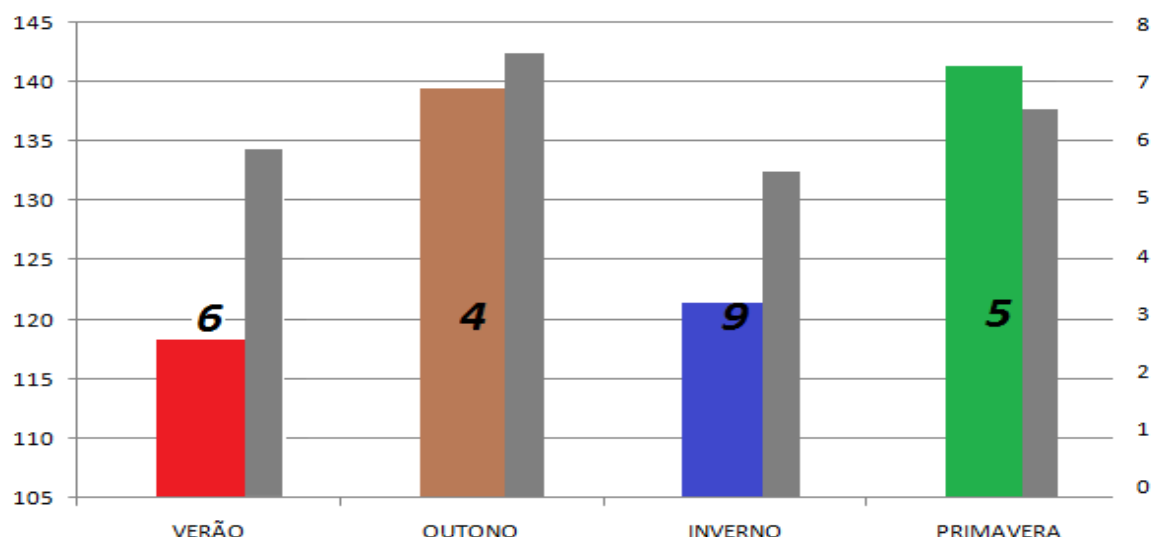


Figura 9- Características dos CCPE no período 2004-2013. Para cada estação do ano, a barra esquerda refere-se à média dos acumulados de chuva dos casos (mm, eixo Y esquerdo), a barra da direita refere-se à duração média dos casos (dias, eixo Y direito) e o algarismo refere-se ao total de casos.

Uma vez obtidos e organizados os CCPE, foram organizados por meses e anos (figura 10). Pode-se observar na figura 10, como a maior quantidade de casos acontece nos meses de fevereiro, agosto e setembro. Esses meses são no fim do verão e do inverno, praticamente no início das estações de transição, quando existem condições na atmosfera para desenvolver os casos, a partir de um maior número de sistemas frontais estacionários e de sistemas convectivos de mesoescala atuando na região, segundo as referências antes analisadas. Os anos 2007, 2009 e 2010 possuem o maior número de casos, deles, os 2 últimos com a influência do Niño moderado, que segundo Mo e Berbery (2011) e Tedeschi et al. (2014) o fenômeno da grande escala tem relação com eventos de extrema precipitação. Têm-se relatos de alguns danos significativos à população e à economia, causados por fortes chuvas, que agora se podem relacionar aos períodos dos CCPE para ser abordados mais adiante neste trabalho.

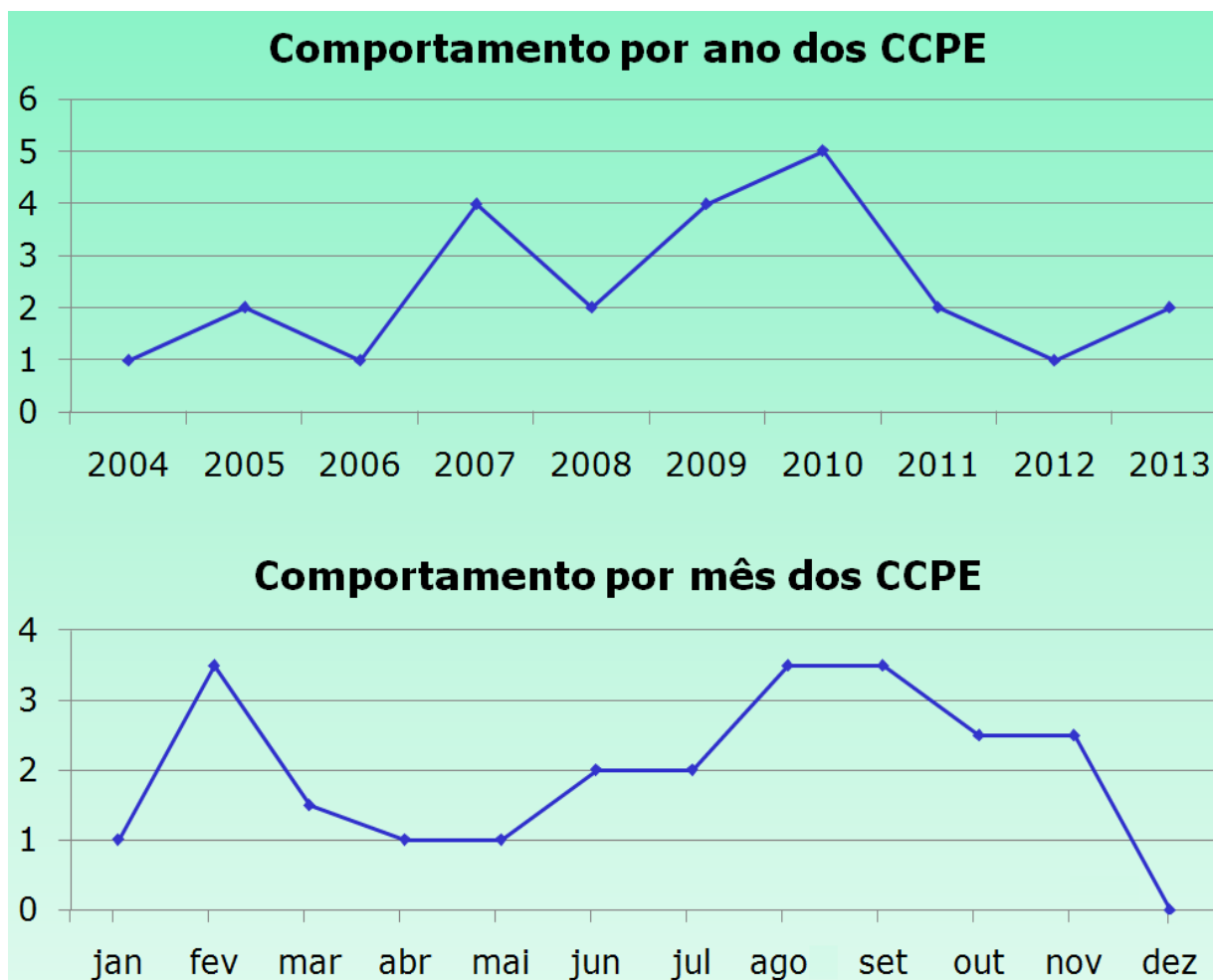


Figura 10- Representação por ano e mês dos CCPE.

#### 4.2- Padrões atmosféricos

Nesta seção são apresentados os Padrões de Circulação Atmosféricos para os CCPE, obtidos em sequência de  $k$  dias e os compostos dos casos mais correlacionados, para descrever as condições atmosféricas que iniciaram e mantiveram a chuva persistente, extrema e abrangente. A sequência de dias começa em,  $k=1$ , que representa as condições atmosféricas 48 horas antes de iniciar o registro da chuva persistente nas estações meteorológicas, continuando com,  $k=2$ , que foram 24 horas antes do registro,  $k=3$  foi o início do caso registrado ou primeiro dia com chuva persistente, o segundo dia,  $k=4$ , o terceiro dia,  $k=5$ , e o quarto dia,  $k=6$ , que é o número mínimo de dias com chuva persistente nos casos.



#### 4.2.1- Obtenção das PSP.

Mediante a aplicação da PSP descrita na metodologia, foi organizada a matriz **X** de entrada, obtendo 24 colunas por (41\*37\*6) linhas de longitude - latitude-sequência em dias (k) respectivamente. Foi obtida, a partir de **X**, a matriz de correlação **R** que fornece os autovalores e autovetores e dela a matriz **U** de componentes principais padronizados. Temos obtido assim 24 modelos de sequências principais a partir das 24 colunas da matriz **U**. Cada um destes modelos inclui uma serie de seis campos espaciais sucessivos no tempo, que representam uma sequência de seis dias de duração.

Na tabela 3 se mostram as variâncias representadas e acumuladas para as 24 componentes principais obtidas neste trabalho. Entende-se que a maior parte da variância se encontra na primeira sequência principal obtida, primeira coluna de **U** e à medida que se avança para sequências de ordem superior, a variância residual vai diminuindo e se redistribuiu de forma uniforme para as demais componentes até chegar à última coluna 24. Foi selecionada a primeira componente principal como mais significativa, representando a maior variância total e da qual se obtém os mapas da PSP deste estudo.

Tabela 3- Distribuição da variância explicada e acumulada (%) para as 24 PSP calculadas.

	PSP.1	PSP.2	PSP.3	PSP.4	PSP.5	PSP.6	PSP.7	PSP.8	PSP.9	PSP.10	PSP.11	PSP.12
Variância	67,70	6,62	4,90	3,87	2,31	1,84	1,64	1,39	1,32	1,09	1,07	0,80
Acumulado	67,70	74,32	79,22	83,08	85,39	87,24	88,88	90,27	91,59	92,68	93,75	94,55
	PSP.13	PSP.14	PSP.15	PSP.16	PSP.17	PSP.18	PSP.19	PSP.20	PSP.21	PSP.22	PSP.23	PSP.24
Variância	0,79	0,66	0,58	0,55	0,53	0,46	0,43	0,38	0,34	0,30	0,23	0,18
Acumulado	95,35	96,01	96,59	97,14	97,67	98,13	98,56	98,94	99,28	99,59	99,82	100,00

#### 4.2.2- Mapas da PSP mais significativa

A figura 11 mostra os mapas em sequência correspondentes com a primeira coluna da matriz **U**, primeira PSP com 67,7% da variância dos casos, com a mesma distribuição espacial especificada na matriz de entrada **X**.

Dois dias antes de ser registrada a chuva persistente,  $k=1$ , se observa a configuração típica dos anticiclones quase permanentes nos oceanos Pacífico e Atlântico. O anticiclone do Pacífico tem influência sobre o litoral a oeste da América do Sul e o anticiclone do Atlântico incide sobre todo o RS. Pode-se visualizar um pequeno cavado no sudeste da Argentina que parece estar inter-relacionado com uma extensa área de baixas pressões em todo o centro do continente. O desenvolvimento dessa região de baixas pressões será o fator inicial que vai favorecer o começo da chuva para os próximos dias na região.

No dia seguinte,  $k=2$ , se observa a formação de um possível centro de baixa pressão no norte-nordeste da Argentina, com escoamento do vento oriundo da região norte do RS, mantido pelo anticiclone do Atlântico. Esta baixa pressão parece ter relação com o cavado do dia anterior, agora mais profundo sobre o sul do Uruguai e parte do oceano Atlântico. Ambos anticiclones antes descritos mantêm sua intensidade.

Para o dia seguinte da sequência, quando se começa a registrar a precipitação,  $k=3$ , se observa o deslocamento da possível baixa pressão sobre o leste da Argentina chegando a incidir sobre o oeste do RS e parte do oceano Atlântico, neste último, se encontra o cavado de dias anteriores. O escoamento do vento se mantém da região norte do RS em relação à baixa pressão em desenvolvimento. Os centros de Altas oceânicos antes descritos mantêm sua intensidade, porém, o grande centro anticiclônico do oceano Atlântico começa se deslocar para o leste, deixando de influir sobre o continente. A região anticiclônica no oeste da América do Sul se expande, chegando até o sul do Uruguai.

Para os dias seguintes com chuva,  $k=4$  e  $k=5$ , o anticiclone do Atlântico se desloca mais para o leste, permitindo que se desloque para o sudeste a extensa região de baixa pressão do centro de América do Sul de dias anteriores, com seu centro agora no oeste do RS. Com isso, esse sistema influencia todo o estado e até

parte do oceano Pacífico, onde o cavado de dias anteriores se afasta para o leste no oceano Atlântico até desaparecer. O anticiclone quase permanente do oceano Pacífico fica bem mais intenso que dias antes, mantendo relação com a região anticiclônica observada em todo o oeste da América do Sul chegando ao sul do Uruguai.

Para o último dia em sequência,  $k=6$ , no oceano Atlântico, seu anticlone característico se mantém afastado do continente, permitindo um deslocamento para leste da região de baixas pressões antes mencionada, a qual incide sobre todo o RS e parte do oceano Atlântico, onde não se observa o cavado de dias antes. O anticiclone do oceano Pacífico permanece intenso, mantendo incidência sobre o oeste da América do Sul, e um pequeno centro de alta pressão se formou ao sul do Uruguai.

Praticamente todo o RS fica dominado pelas condições de baixas pressões por dias, com possível relação ao cavado no oceano Atlântico ao sudeste do Uruguai, o qual se desloca para o leste até desaparecer. Durante todos os dias em sequência, o anticiclone quase permanente do oceano Pacífico, se manteve bem intenso com relação a pequenos centros de altas no oeste da América do Sul e ao sul do Uruguai. Estas são as condições, em quanto à variável pressão, que propiciam as condições das demais variáveis, analisadas nas seções posteriores deste estudo, para o início e manutenção da chuva persistente extrema sobre a região de estudo.

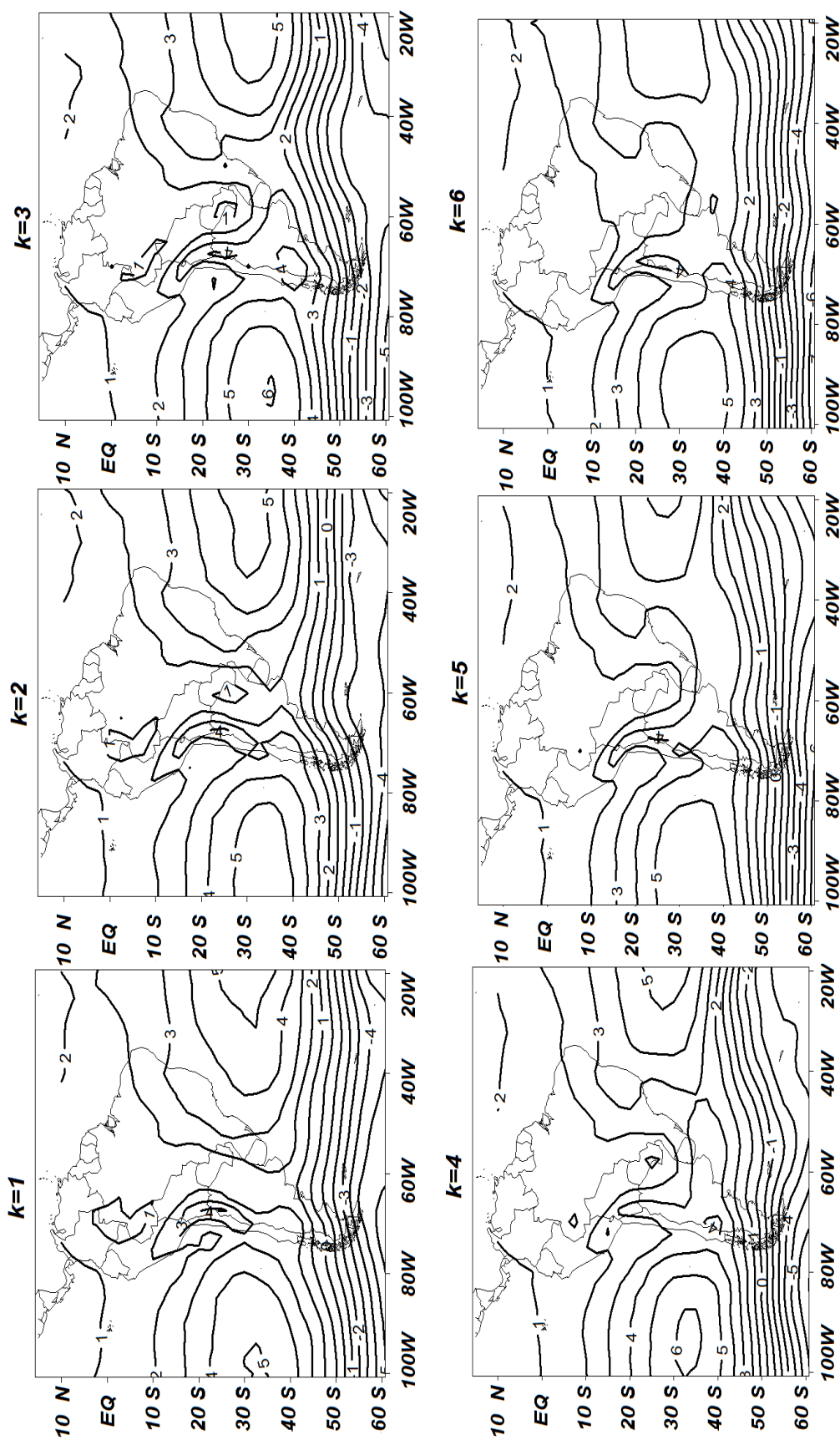


Figura 11- Representação da Primeira Sequência Principal de Padrões de Circulação, obtida a partir da primeira coluna da matriz de Componentes,  $U$ , calculada para a variável PNMM (hPa) dos CCPE.

Como explicado na metodologia, foram calculados os componentes de carga ou peso a partir da matriz **F**, fornecendo a correlação entre cada sequência principal obtida e cada variável original de entrada.

A figura 12 mostra como, a partir da seleção da primeira componente de carga, ortogonal e não correlacionada com as demais, se forma o gráfico de correlação em função da ordem da variável. Visualiza-se na figura 12, a variabilidade da primeira sequência principal obtida com respeito aos CCPE, com valores de correlação positivos na totalidade para esta primeira componente. Existe assim uma correlação forte direta, indicando que durante o período analisado, existe uma concordância de sinais entre as variáveis originais e o primeiro padrão de sequência obtido. Na figura 12 também são determinados os casos mais correlacionados, que segundo a metodologia deveriam superar o limiar de 70 %. Observa-se como somente 4 casos ficaram abaixo do valor esperado, os mesmos, com respeito à tabela 2, são os casos 6-9-21-23. Pode-se analisar que o inverno apresenta o maior número de casos menos correlacionados e que todos os casos da primavera junto a quase todos do verão e outono, estão mais correlacionados, mantendo-se para os mapas dos compostos.

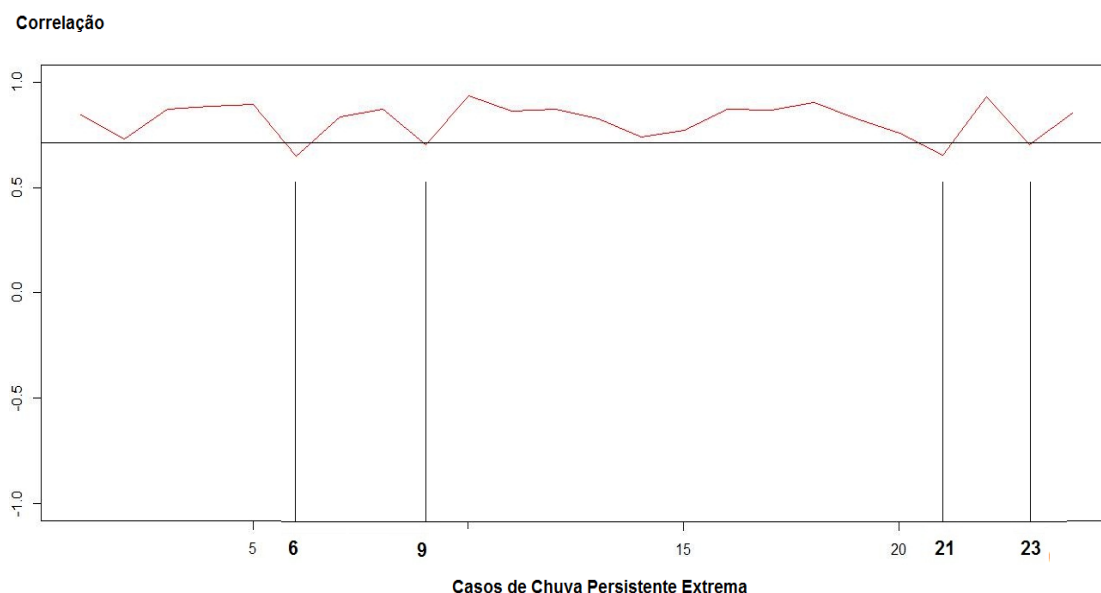


Figura 12- Primeira componente de carga que mostra a correlação entre a primeira componente obtida e as variáveis originais de entrada CCPE. São determinados os casos mais correlacionados maiores ao limiar de 70%. Destacam-se os 4 casos fora da correlação esperada.

#### **4.2.3- Comportamento da Precipitação e Análise Sinótica dos Compostos.**

Foram feitos neste estudo, a análise do comportamento da precipitação dos 20 CCPE mais correlacionados, em cada uma das estações meteorológicas dentro do estado do RS (figura 13). Na sequência da figura 13, se pode observar que no dia do início,  $k=3$ , onde começa a contagem da chuva, os casos têm uma distribuição dentro do estado de forma homogênea, começando a serem visualizados os maiores acumulados para o norte- oeste da região para o dia em sequência,  $k=4$ . No dia seguinte,  $k=5$ , se observa uma distribuição do comportamento das chuvas mais para o sul do RS, mas a maioria dos casos com maiores acumulados persiste no oeste, indicando um fortalecimento da chuva acumulada sobre todo o estado, perto dos 150 mm. Para o dia final da sequência,  $k=6$ , se tem os casos com acumulados mais intensos, com quase 200 mm registrados em algumas estações meteorológicas. A distribuição da chuva nos casos volta a ser homogênea, persistindo durante todos os dias em sequência analisados, na cidade de Santa Vitória do Palmar, ao sul do RS, os maiores acumulados com respeito aos demais casos. Tudo indica que existe uma relação do comportamento da chuva, com a extensa região de baixas pressões do centro de América do Sul, antes observada nas PSP, a qual teve um deslocamento de noroeste do RS até o sudeste do estado, saindo para o oceano Atlântico, onde se observou em superfície o cavado em deslocamento.

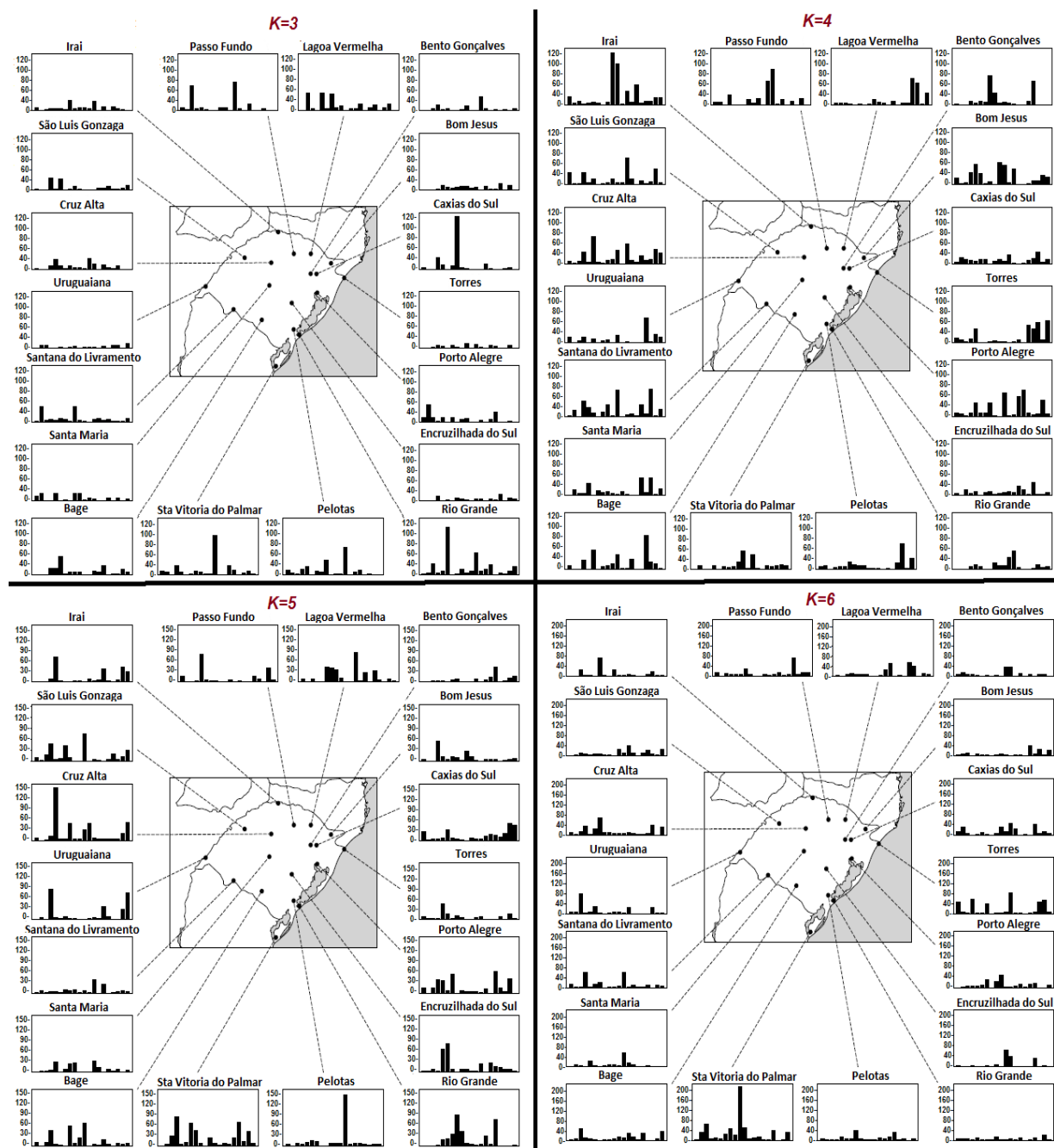


Figura 13- Representação na sequência de dias,  $k=3$ ,  $k=4$ ,  $k=5$  e  $k=6$ , do comportamento da precipitação. Em cada estação meteorológica se representa um gráfico com ordenada que se refere à chuva acumulada em milímetros e abscissa que se refere aos 20 CCPE mais correlacionados.

Foram feitos os compostos das variáveis mais importantes e antes declaradas na metodologia, para os 20 CCPE mais correlacionados, em sequência de  $k=6$  dias. A partir destes compostos, a análise sinótica foi feita, para dar uma explicação ao início e manutenção da chuva persistente, extrema e abrangente.

Como mesmo se analisou nos mapas das PSP, para os dias antes de iniciar a chuva,  $k=1$  e  $k=2$ , sobre a região do RS existe a influência do sistema de altas pressões (Alta Subtropical do Atlântico Sul). Este anticiclone favoreceu ao escoamento do vento do setor norte do Brasil próximo à superfície, e com ele, ao desenvolvimento de uma baixa pressão no norte da Argentina, abrangendo todo o centro do continente, que parece ter relação com um cavado em superfície a sudeste da Argentina no oceano Atlântico (figura 14- A).

Sobre o RS no dia  $k=1$ , o cavado que se observa sobre o oceano Pacífico ao oeste do continente em 500 hPa (figura 14- A), desenvolve nesse nível da atmosfera para o dia  $k=2$ , uma região de advecção da vorticidade negativa (ciclônica) no oeste do RS (figura 14- B), relacionada à região desenvolvimento de baixas pressões em superfície antes descrita. Em função das condições na troposfera média, observa-se uma ampla região instável com movimentos ascendentes, dada pela variável  $\omega$  negativa sobre a Argentina, chegando ao sudoeste do RS entre os dias  $k=1$  e  $k=2$  (figura 14- A). Em 850 hPa (figura 14- C-D), observa-se um escoamento do setor norte em relação do RS, trazendo da Amazônia e do oceano Atlântico ar quente e úmido para esta região, resultando em uma convergência do fluxo de umidade em todo o centro do continente, incluindo o RS.

O cavado observado nos níveis médios da atmosfera provoca a advecção da vorticidade ciclônica, junto ao escoamento do vento de oceano Atlântico e da Amazônia que trazem ar quente e úmido, desenvolvem a instabilidade necessária à convecção sobre o estado do RS. Esta convecção ajuda ao desenvolvimento e intensificação do centro de baixas pressões antes mencionado, o qual, para os próximos dias provoca o início da chuva persistente sobre o estado.

Na região sudeste da Argentina no oceano Atlântico, onde se observou o cavado em superfície, se observa uma forte confluência do vento em forma linear, dividindo uma massa de ar mais quente e úmida ao norte- nordeste de outra mais



fria e seca ao sudeste, se deslocando para o sudeste do RS no oceano Atlântico, (figura 14 C- D).

Em altos níveis (200 hPa) e relacionado à convergência do vento da baixa pressão em desenvolvimento em superfície, uma extensa área de divergência do vento se observa, se aproximando ao sul- sudoeste do RS, com escoamento do vento de oeste (figura 15- A). Pelas condições antes descritas desde a superfície até o nível de 200 hPa, se observam valores negativos de ômega se aproximando ao RS pelo oeste (figura 15- B), os mesmos, também favorecem as condições de instabilidade que provocam o início para os próximos dias da chuva persistente, extrema e abrangente na região de estudo.

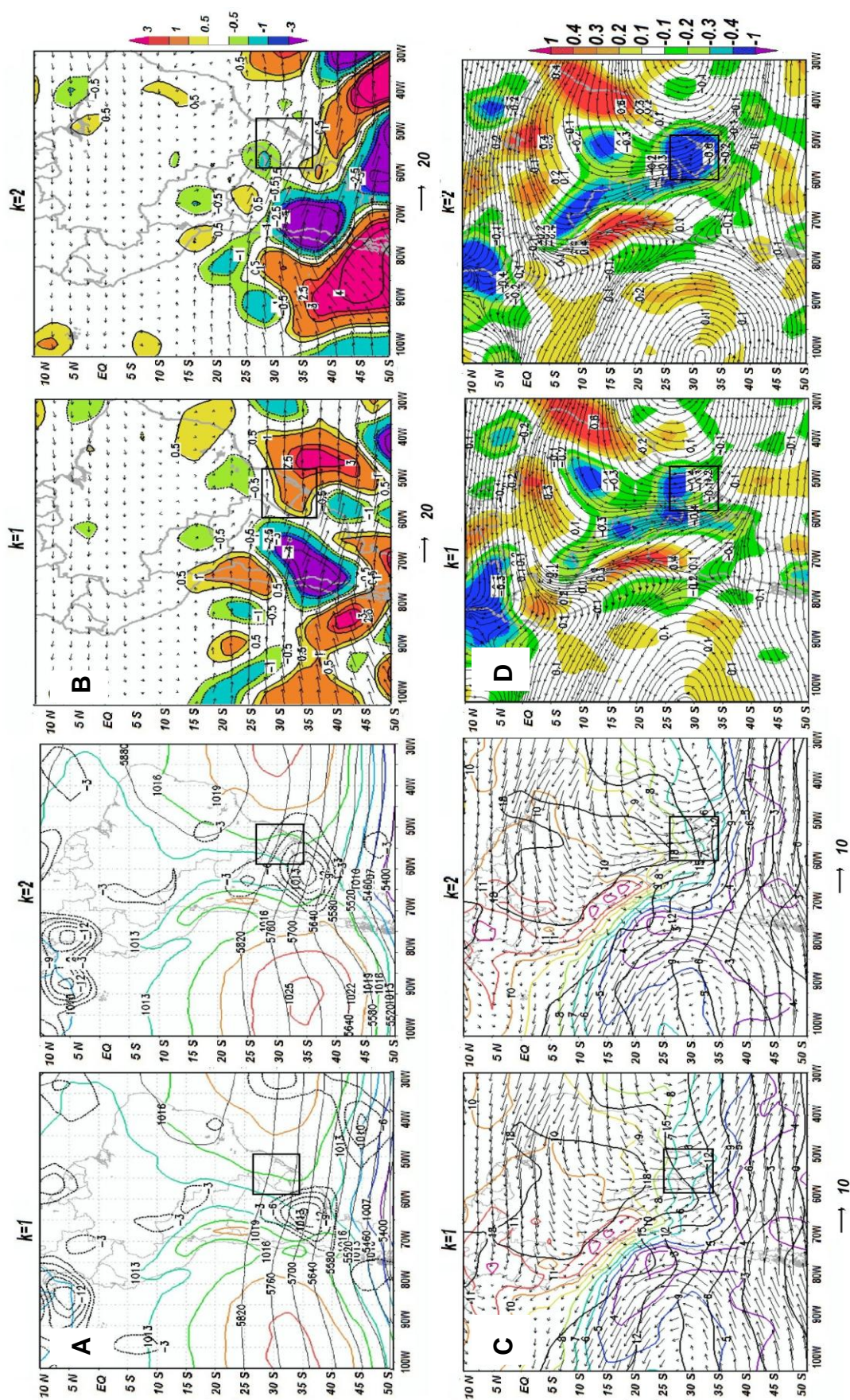


Figura 14- Composto dos casos mais correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10}\text{s}^{-1}$ ) com sentido e magnitude do vento ( $\text{m/s}$ ) em 500 hPa. (C) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica ( $\text{g/kg}$ ) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento ( $\text{m/s}$ ) em 850 hPa. (D) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}\text{ g/kg s}^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.



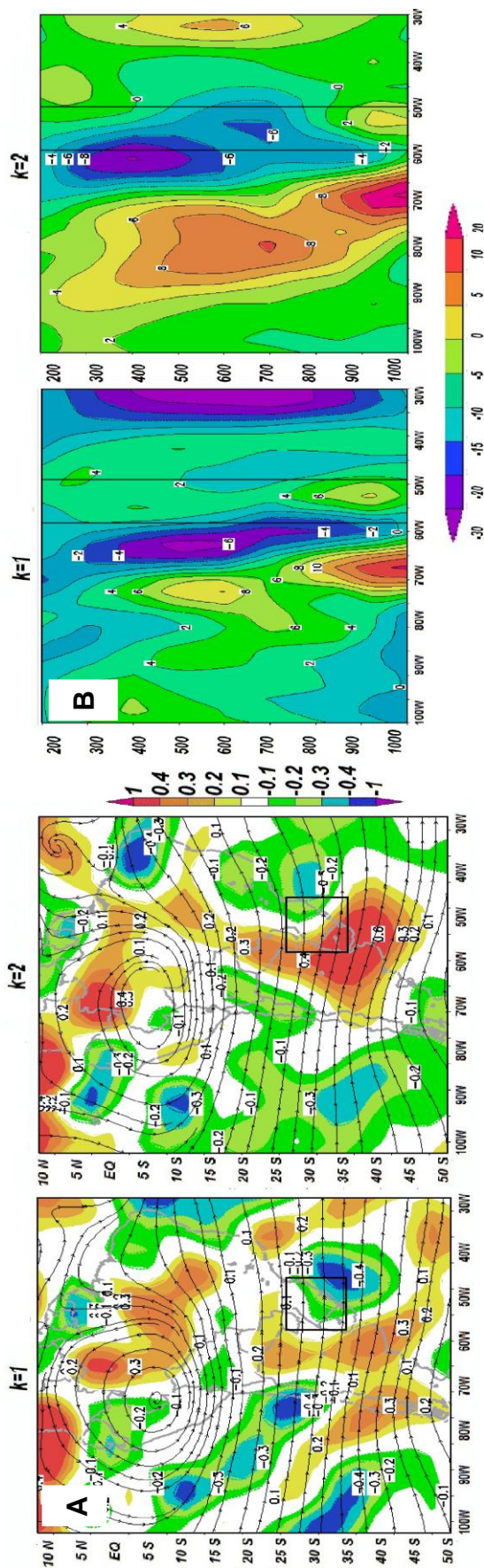


Figura 15- Composto dos casos mais correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de ômega ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS ( $-34^\circ$  e  $-27^\circ$  latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).

Como observado nos mapas das PSP, desde o dia  $k=3$ , quando começa a ser registrada a chuva persistente nas estações meteorológicas, até o dia  $k=6$ , o anticiclone do oceano Atlântico se desloca mais para o leste sem influenciar no continente (figura 16- A). Pode-se observar na figura 16- A, como o anticlone do oceano Pacífico apresenta-se intenso e quase estacionário, mantendo sua influência sobre todo o oeste e sul de Sul da América do Sul. Deste sistema também se desprende um pequeno centro de alta pressão no centro da Argentina, que chega ao sul do Uruguai se deslocando para o leste até o oceano Atlântico no dia  $k=6$ . A região de baixas pressões em desenvolvimento nos dias anteriores atinge o RS e, o último dia,  $k=6$ , se desloca até o oceano Atlântico. O cavado em superfície que se observou no oceano Atlântico, agora se desloca passando desde o sudeste do Uruguai até o sudeste do RS no oceano Atlântico, entre os dias  $k=3$  e  $k=4$ , até desaparecer no dia  $k=6$ .

Com a amplificação do cavado em 500 hPa a partir do dia  $k=3$  (figura 16- A), se observa uma região de advecção da vorticidade negativa (ciclônica) se aproximando ao estado, e especificamente sobre RS, a partir do dia  $k=5$  (figura 16- B). Esse sistema favorece à intensificação da região de baixas pressões em superfície. O escoamento do vento, a partir do dia  $k=3$ , se mantém mais intenso do setor norte no nível de 850 hPa (figura 17- A- B), trazendo um aumento da temperatura e a umidade predominante da região amazônica sobre todo o RS (figura 17- A). Estes ventos, junto á alta temperatura e umidade, provocam fortes movimentos ascendentes em superfície sobre o RS (figura 16- A), e com eles, a instabilidade que propicia as condições de chuva persistente sobre a região de estudo. Todo parece indicar que as condições que iniciarem e mantiveram nos primeiros dias a chuva foram termodinâmicas, com o vento, a temperatura e a umidade favoráveis para a instabilidade sobre a região, até que chega a advecção de vorticidade ciclônica, como forçante dinâmica, que manteve a intensidade do evento por dias.

A convergência do fluxo de umidade em 850 hPa, sobre todo o RS é observada, a partir do dia  $k=3$  (figura 17- B), mantendo as condições da baixa pressão sobre o estado. Observa-se na figura 17- B, para os dias  $k=4$ ,  $k=5$  e  $k=6$ , uma circulação ciclônica do vento em 850 hPa ao oeste do RS, com uma circulação

anticiclônica ao sul da mesma, essas circulações se favorecem entre si, com respeito aos ventos que lhes rodeiam.

Sobre o cavado do oceano Atlântico, se observa a manutenção da confluência do vento em forma linear (figuras 17- A- B), podendo confirmar que é um sistema frontal que traz condições favoráveis desde o mar para a baixa pressão que fica sobre o RS, ao manter uma massa de ar mais quente e úmida ao norte e outra mais fria e seca ao sul da mesma.

O padrão de frente fria quase estacionária entre os dias  $k=4$  e  $k=5$ , indica que a mesma, se desloca para o leste do oceano Atlântico no dia  $k=6$  (figuras 16- A e 17- A- B). Em altos níveis, 200 hPa, a partir do dia  $k=3$ , se intensifica a área de divergência do vento sobre todo o RS, o qual favorece a baixa pressão em superfície, com escoamento do vento de oeste (figura 18- A). Para todos os dias em sequência a partir de  $k=3$ , se observam movimentos ascendentes desde superfície até a alta troposfera, provocados pelas condições antes descritas, o qual mantém a chuva persistente extrema (figura 18- B).

No dia  $k=6$ , em alguns casos fechou a chuva persistente, mas em outros de maior duração em dias, continuo até que as condições atmosféricas favoráveis e antes descritas terminarem. Neste último dia em sequência de estudo, se têm os maiores registros da chuva acumulada nos CCPE.

Uma interessante característica desses compostos, é o desprendimento do cavado em 500 hPa observando entre  $k=1$  e  $K=2$  (figura 14- A), provavelmente devido à ação da corrente do jato de altos níveis e da cordilheira dos Andes. A parte norte deste cavado (ao norte de  $40^\circ$  sul) fica estacionária à costa do Chile, enquanto a parte sul se desloca para o leste desse país. Este desprendimento parece estar associado com a intensificação da frente fria observada nos casos a partir do dia  $k=4$  (figuras 17- A- B). A parte estacionária do cavado, contribui para a formação e intensificação do centro de baixa pressão em superfície. Esses dois sistemas, contribuem para uma extensão prolongada da chuva sobre RS.



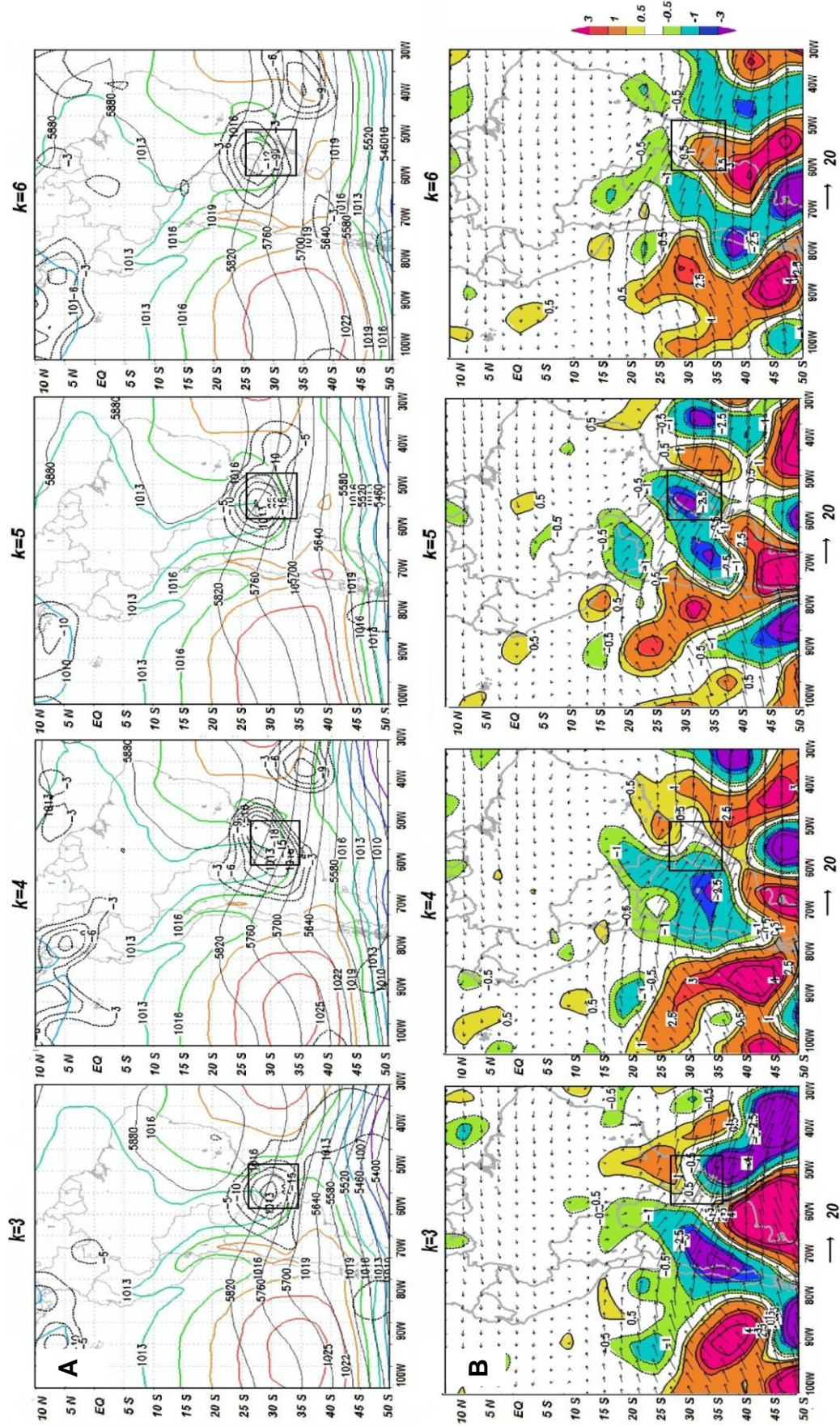


Figura 16- Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10} \text{s}^{-1}$ ) com sentido e magnitude do vento ( $\text{m/s}$ ) em 500 hPa.



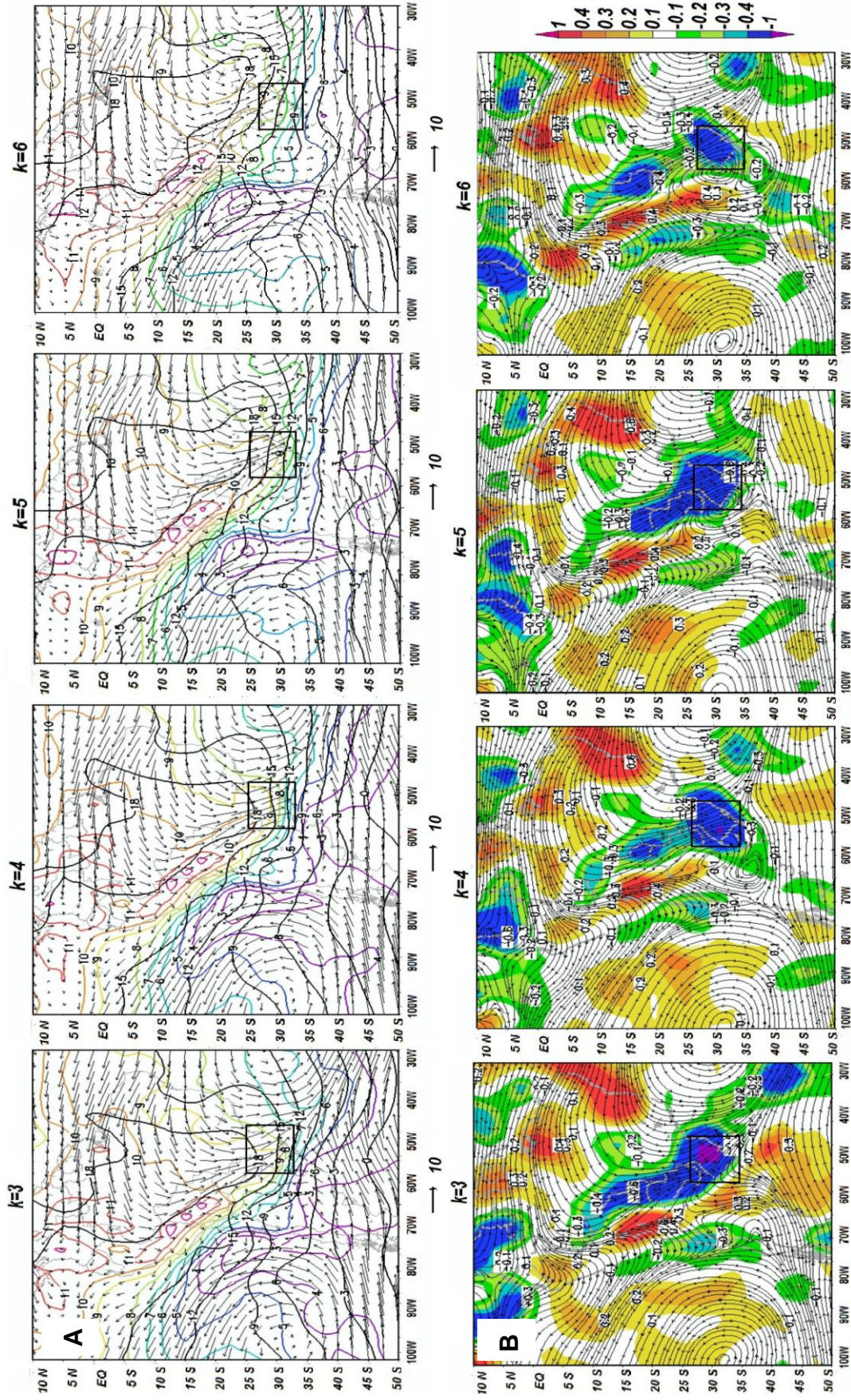


Figura 17- Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa. (B) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}$  g/kg s $^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.



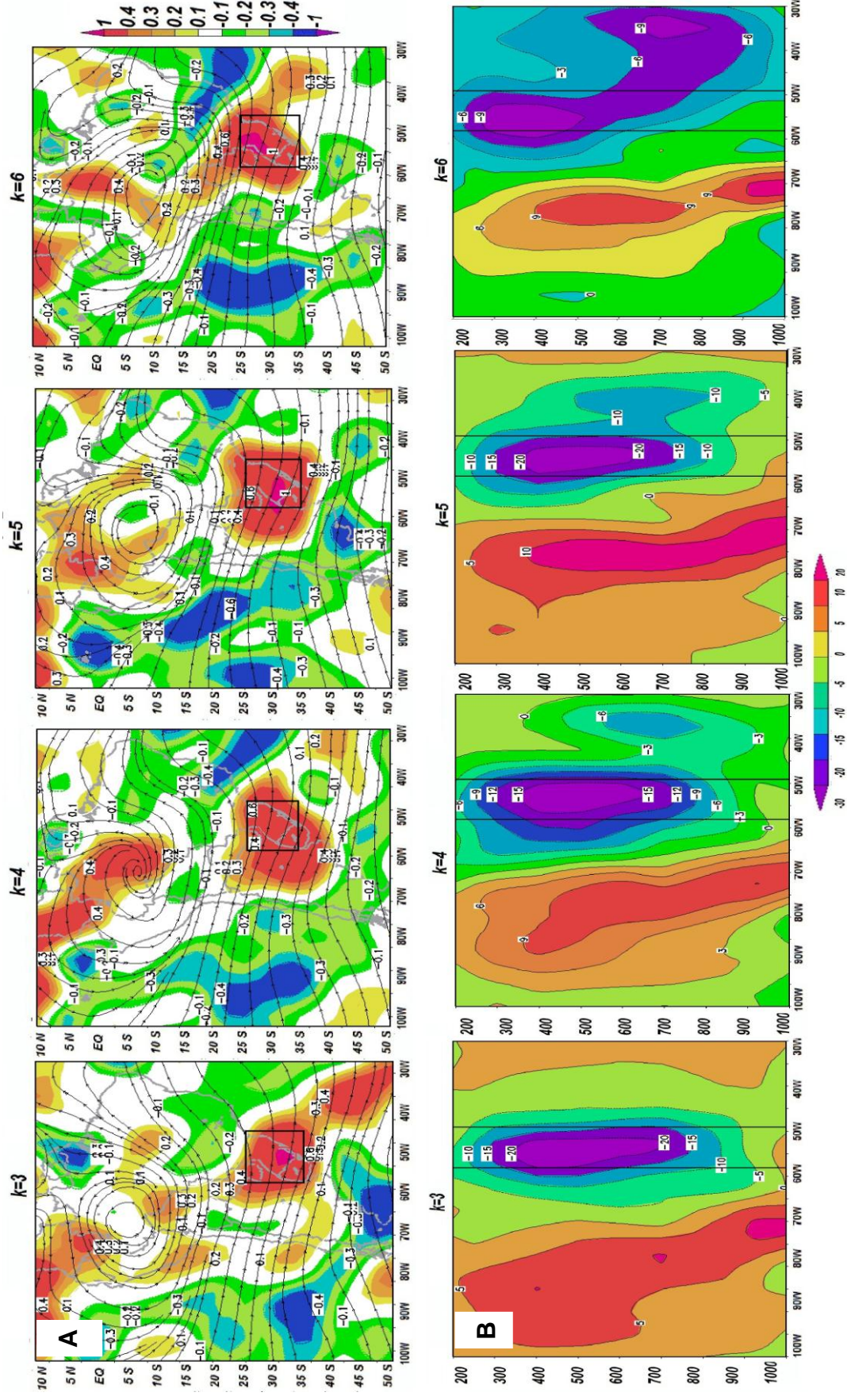


Figura 18- Composto dos casos mais correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5} s^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de ômega ( $Pa s^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS (-34° e -27° latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).



Em relação aos compostos para os 4 casos menos correlacionados, as variáveis analisadas, em forma geral, se comportam de igual forma que nos compostos antes analisados, favoráveis para o início e manutenção da chuva persistente na região. Nestes casos, o padrão continua sendo a chegada de uma frente fria pelo sudeste do RS desde o oceano Atlântico (figura 19 - A), mas por serem menos casos e a maioria do inverno, agora o padrão médio indica que a frente fria penetra pelo interior do continente até o leste da Argentina, ficando quase estacionária entre os dias  $k=3$  e  $k=5$  (figuras 19- A e 20- A- B).

Observa-se um deslocamento da frente fria sobre o norte- nordeste do RS, que junto à advecção da vorticidade negativa em 500 hPa para todos os dias mostrados (figura 19- B) e a forte confluência do vento no nível de 850 hPa com ar quente e úmido proveniente da região da Amazônia (figuras 20- A-B), favorecem a formação no litoral, no nordeste do RS, de um ciclone. Este sistema se observa com seu centro em superfície no dia  $k=6$  (figuras 19- A).

Em altos níveis, 200 hPa, para todos os dias mostrados, se observa intensa a área de divergência do vento sobre todo o RS, o qual favorece a baixa pressão em superfície, com escoamento do vento da região oeste (figura 21- A). Durante todos os dias em sequência, se observam movimentos ascendentes desde superfície até a alta troposfera, provocados pelas condições antes descritas, o qual mantém a chuva persiste extrema (figura 21- B).

Assim como observado nos compostos dos casos mais correlacionados, também é identificado para os menos correlacionados, um desprendimento do cavado em 500 hPa (figura 22). A parte sul desse cavado ajudou à formação da frente fria cuja extremidade afetou o RS. Posteriormente, esse cavado desprendido deslocou-se para o oceano Atlântico, permanecendo sobre o RS, a influência do cavado estacionário a oeste da América do Sul.

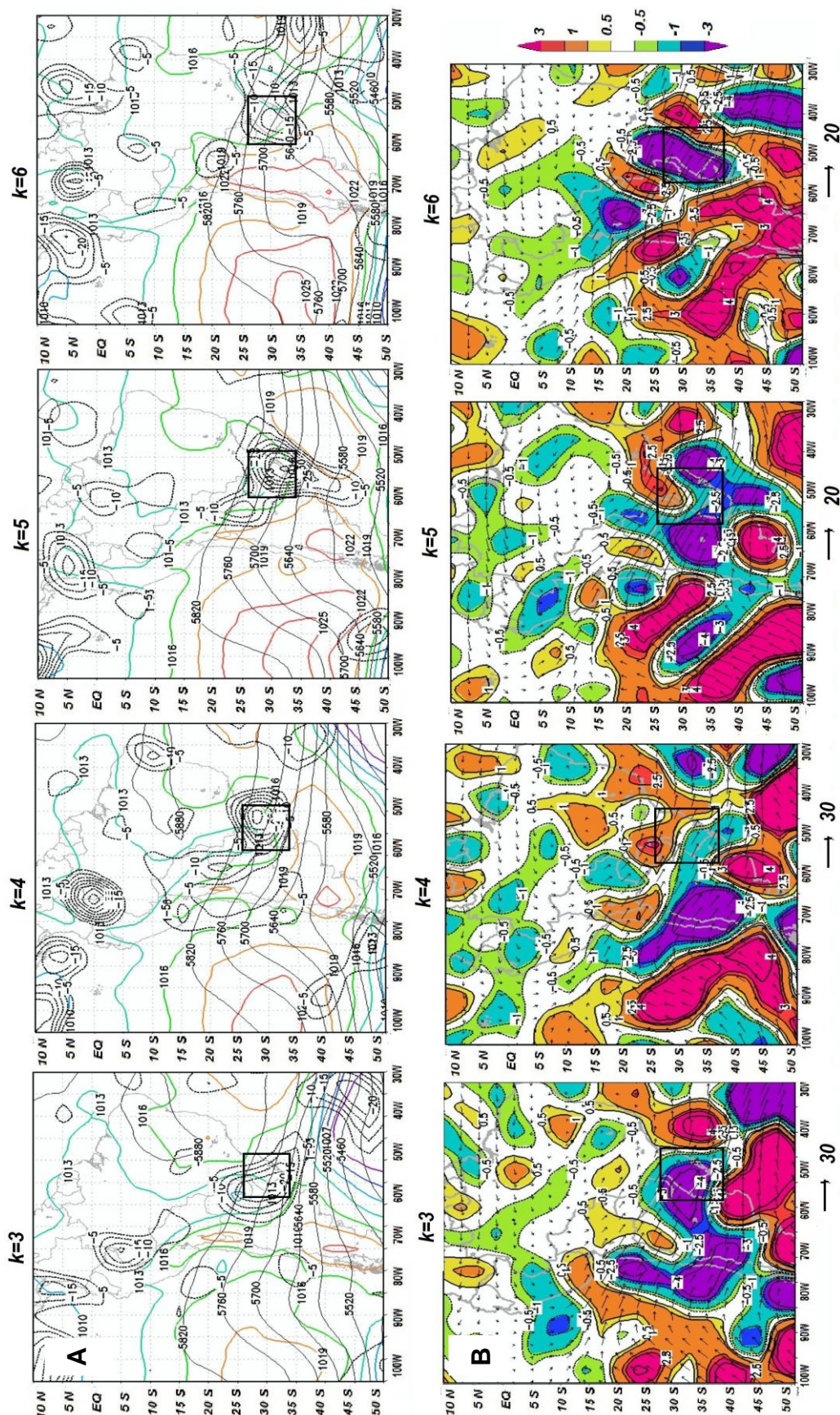


Figura 19- Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Mapa da PNM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de  $\omega$  em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa. (B) Advecção da Vorticidade ( $10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ) com sentido e magnitude do vento (m/s) em 500 hPa.



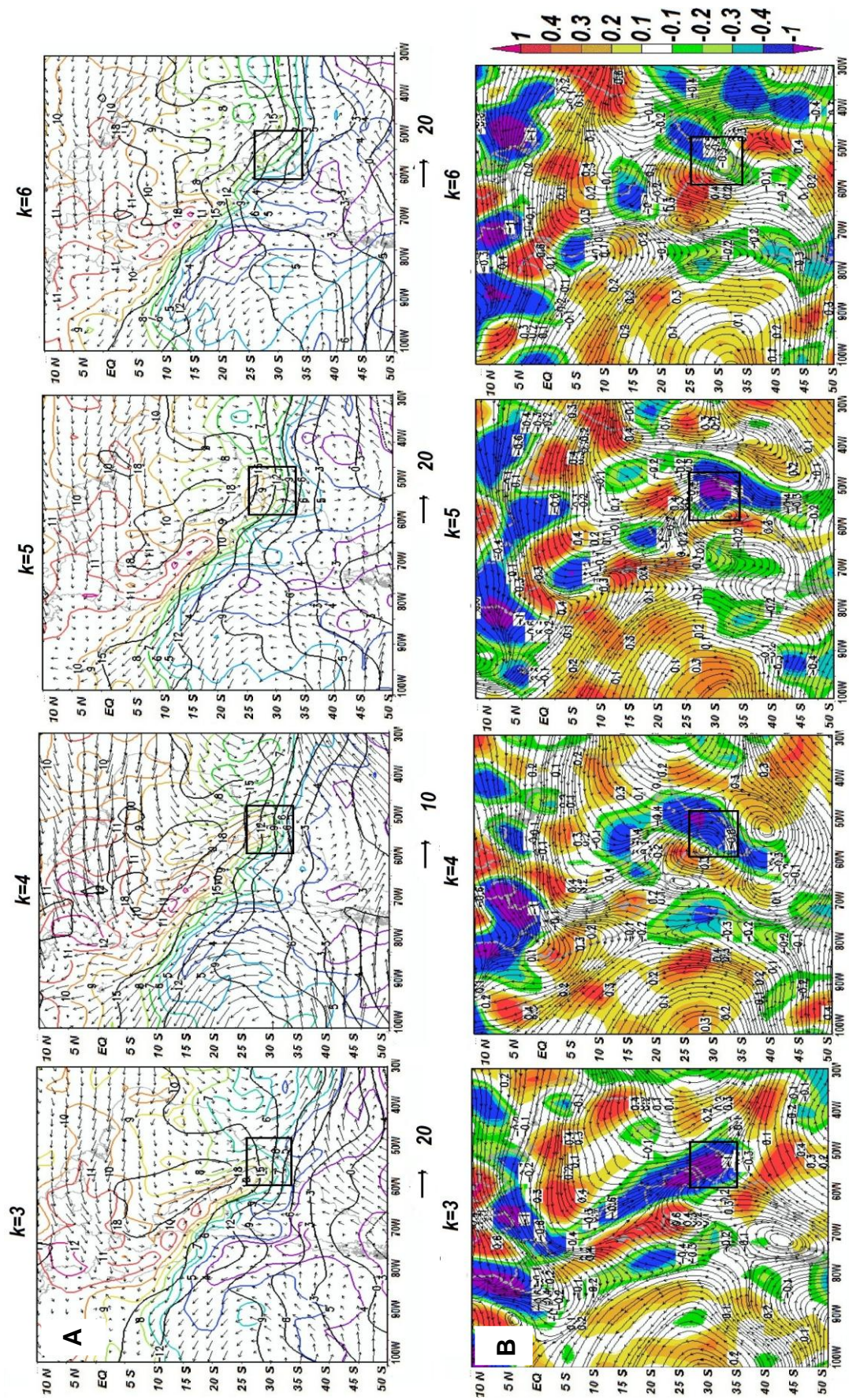


Figura 20- Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento (m/s) em 850 hPa. (B) Divergência do fluxo de umidade ( $10^{-4}$  g/kg s $^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.



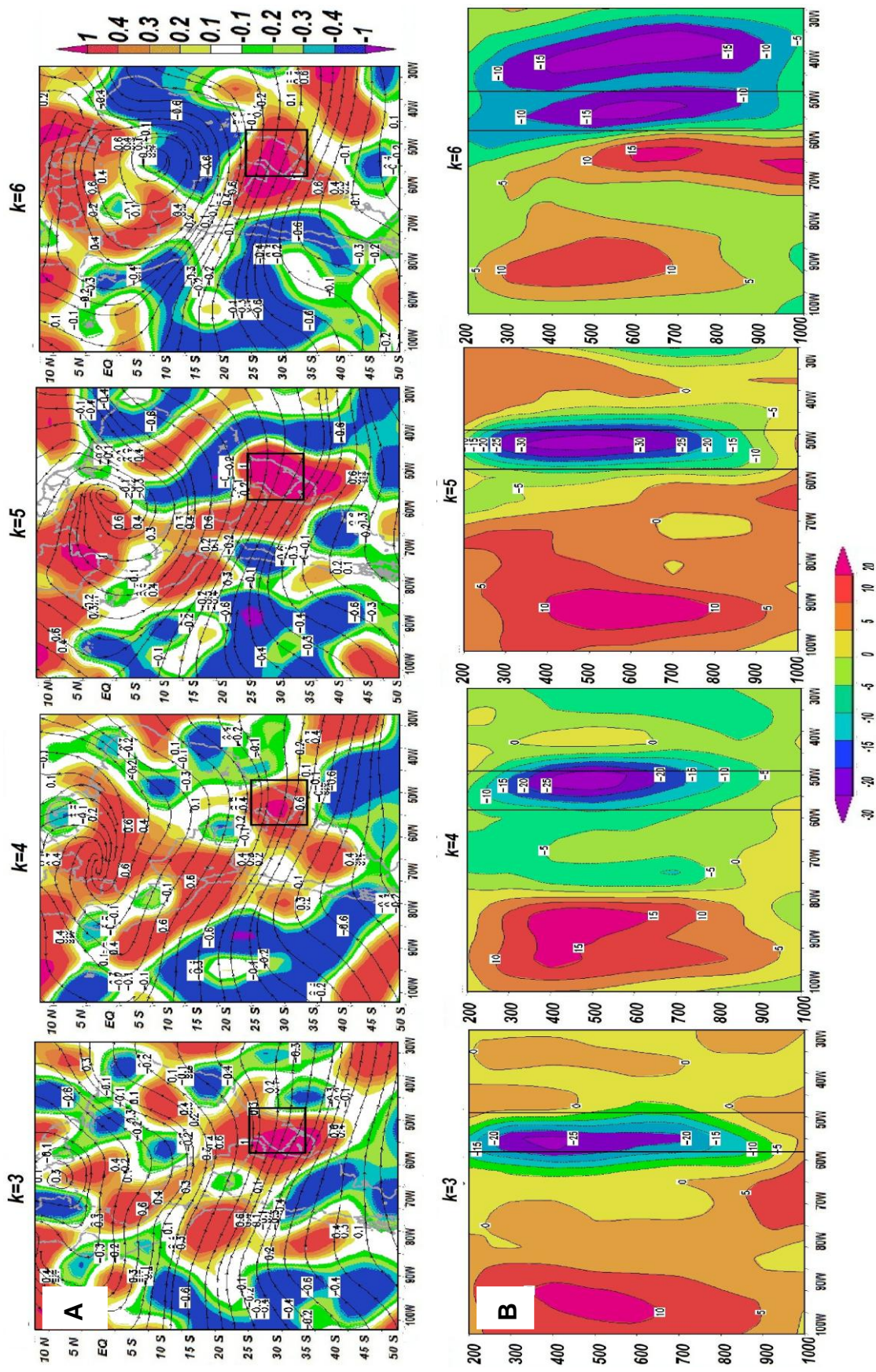


Figura 21- Composto dos casos menos correlacionados, para os 4 dias em sequência quando inicia e se mantém a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). (A) Divergência ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Média de  $\omega$  ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) dentro das latitudes do RS ( $-34^\circ$  e  $-27^\circ$  latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo).

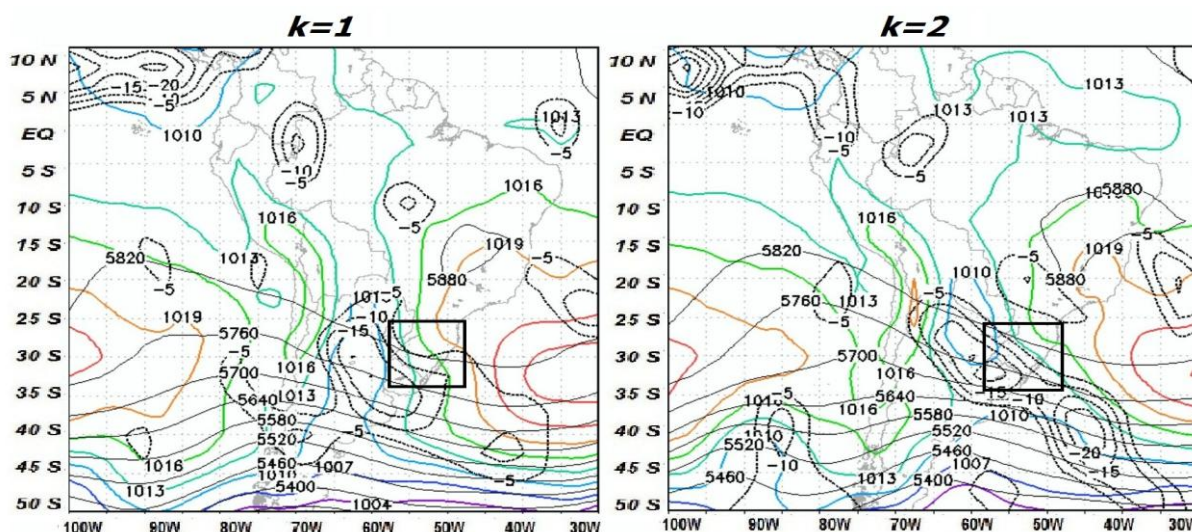


Figura 22- Composto dos casos menos correlacionados, para os 2 primeiros dias em sequência antes de iniciar a chuva persistente. (RS fica dentro do retângulo). Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa.

#### 4.2.4- Análise sinótica do evento de chuva persistente mais intenso.

O evento mais intenso identificado no período de 2004 a 2013 ocorreu entre 4 e 9 de maio de 2004, tendo, portanto, uma duração de 6 dias. Esse evento levou a grandes acumulados de chuva nas 5 principais cidades afetadas, localizadas no litoral do RS. A cidade de Torres, por exemplo, registrou mais de 300 mm durante todo o período (figura 7). O evento teve um acumulado médio de quase 190 mm, na região abrangida por essas estações, durante a sua permanência (tabela 2).

A figura 23 mostra os campos de PNMM, altura geopotencial e ômega em 500 hPa para toda a duração do evento. Fica evidente a existência de um cavado importante na média troposfera, situado a oeste do estado do RS um dia antes do início do evento,  $k=2$ , se intensificando durante a ocorrência da chuva,  $k=5$ , chegando a fechar uma circulação ciclônica em  $k=6$ . Há um importante gradiente nos campos de PNMM, altura geopotencial sobre o estado do RS, com uma orientação praticamente meridional (direções norte-sul e sul-norte para PNMM e Altura geopotencial, respectivamente). A esses gradientes está associado, também, um gradiente de temperatura em baixos níveis, evidente no início do evento, mas



que sofre uma deformação nos dias seguintes, conforme mostram os campos da figura 24- A. Essas condições da camada média-inferior da troposfera sugerem a existência de um sistema frontal semi-estacionário no início do período da chuva. Pode-se observar, também, que o movimento ascendente concentra-se nessas regiões.

A intensificação do cavado em níveis médios proporciona condições para uma ciclogênese em superfície, que inicia em  $k=6$ , na qual se observa o curvamento dos gradientes na baixa troposfera, especialmente o de temperatura (figura 24-A), e claramente definido com a circulação ciclônica e o centro de baixa pressão próximos à costa do RS (figuras 23 e 24- A). Em níveis superiores da troposfera (200 hPa) há divergência do escoamento, especialmente, em  $k=6$  (figura 24- B).

Durante praticamente todo o período de duração da chuva há convergência do fluxo de umidade na baixa troposfera (850 hPa) cobrindo integralmente ou parcialmente o estado do RS (figura 24- C). Os dias  $k=4$  e  $k=6$  se destacam tanto em relação à intensidade dessa convergência quanto na sua abrangência. Lembrando que os campos apresentados referem-se ao início do período da chuva diária registrada, pode-se perceber, por exemplo, que parte da chuva registrada na cidade de Torres durante esse evento (figura 7) teve contribuição do centro de baixa pressão que se formou na costa do sudeste brasileiro ( $k=4$ , figura 23), além daquele que se formou posteriormente, a partir de  $k=6$ . Tal contribuição não pode ser atribuída tão claramente à chuva registrada na cidade de Pelotas.

A figura 23 mostra a distribuição espacial do movimento vertical ascendente (apenas os valores negativos de  $\omega$  são exibidos). A fim de se visualizar a profundidade desse movimento vertical foram feitos cortes verticais médios entre os círculos de latitude que limitam o estado do RS a norte e a sul, como exibidos na figura 25. A existência de profundos movimentos verticais ascendentes pode contribuir significativamente para o registro de grandes volumes de chuva em superfície, especialmente, como neste evento, quando houver um importante aporte de umidade na baixa troposfera.

Fica evidente, da inspeção desses cortes, que o estado do RS sofre a influência praticamente constante de movimentos ascendentes. Há intenso movimento ascendente sobre a parte oeste do RS ( $k=1$ ) com máximo em 700 hPa,

que se desloca para os níveis médios da troposfera ( $k=2$ ) com seu máximo em 500 hPa. Esse movimento vertical parece estar associado ao cavados em superfície e em níveis médios, sendo o primeiro se aproximando do RS pelo noroeste e o último pelo oeste. Entre  $k=2$  e  $k=3$ , período em que se registram as primeiras chuvas desse evento, o máximo de movimento vertical ascendente se desloca para 700 hPa e para o leste do RS. Em  $k=4$  pode-se observar dois núcleos de máxima ascensão vertical: (i) sobre o estado e (ii) sobre o Oceano Atlântico, entre 30 e 40°W. Ambos núcleos se mantêm em 700 hPa. O núcleo observado sobre o oceano está claramente ligado ao centro de baixa pressão que se forma na costa do sudeste brasileiro e se desloca para sudeste, posteriormente. Próximo ao final do evento, entre  $k=7$  e  $k=8$ , apenas a baixa troposfera localizada na parte leste do RS está sob influência de movimentos ascendentes. Essa ascensão do ar, aliada à convergência do fluxo de umidade, também na baixa troposfera, contribuíram para as intensas chuvas registradas nas cidades de Torres (mais de 100 mm) e Porto Alegre e Rio Grande (aproximadamente 50 mm). O evento de chuva persistente chega ao seu fim a partir do momento em que o estado do RS é influenciado, completamente, por profundos movimentos descendentes, em  $k=8$ .

O caso mais intenso identificado nesse estudo foi provocado, portanto, pela estacionariedade de um cavado em níveis médios da troposfera. Esse cavado, com uma orientação NW-SE e um gradiente de altura geopotencial mais intenso corrente abaixo, provoca o estacionamento de uma massa de ar frio em superfície, dando origem a um intenso gradiente térmico sobre o RS (é possível observar o ar frio avançando continente adentro, exceto sobre as regiões sul e sudeste do Brasil; figura 24- A). Esse cavado estacionário proporciona a formação de centros de baixa pressão em superfície, que colaboram para a instabilidade atmosférica e prolongando o período de chuvas sobre o estado do RS, especialmente, em sua porção leste.

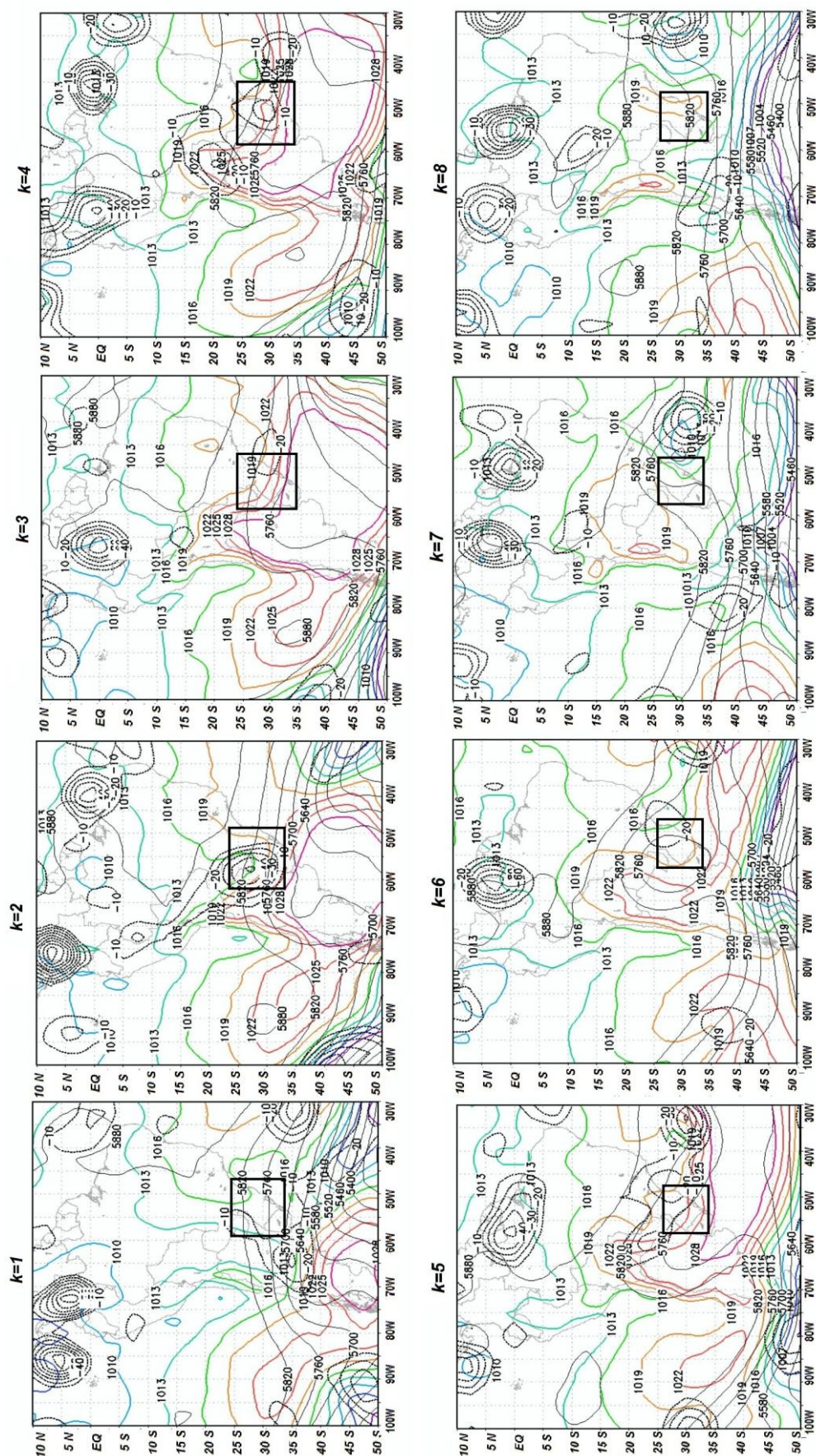


Figura 23- Mapas significativos do caso mais intenso. (RS fica dentro do retângulo). Mapa da PNMM (hPa) em linhas coloridas, Altura Geopotencial em linhas pretas contínuas separadas a cada 60 (mgp) e valores negativos de ômega em linhas pretas pontilhadas ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) em 500 hPa.



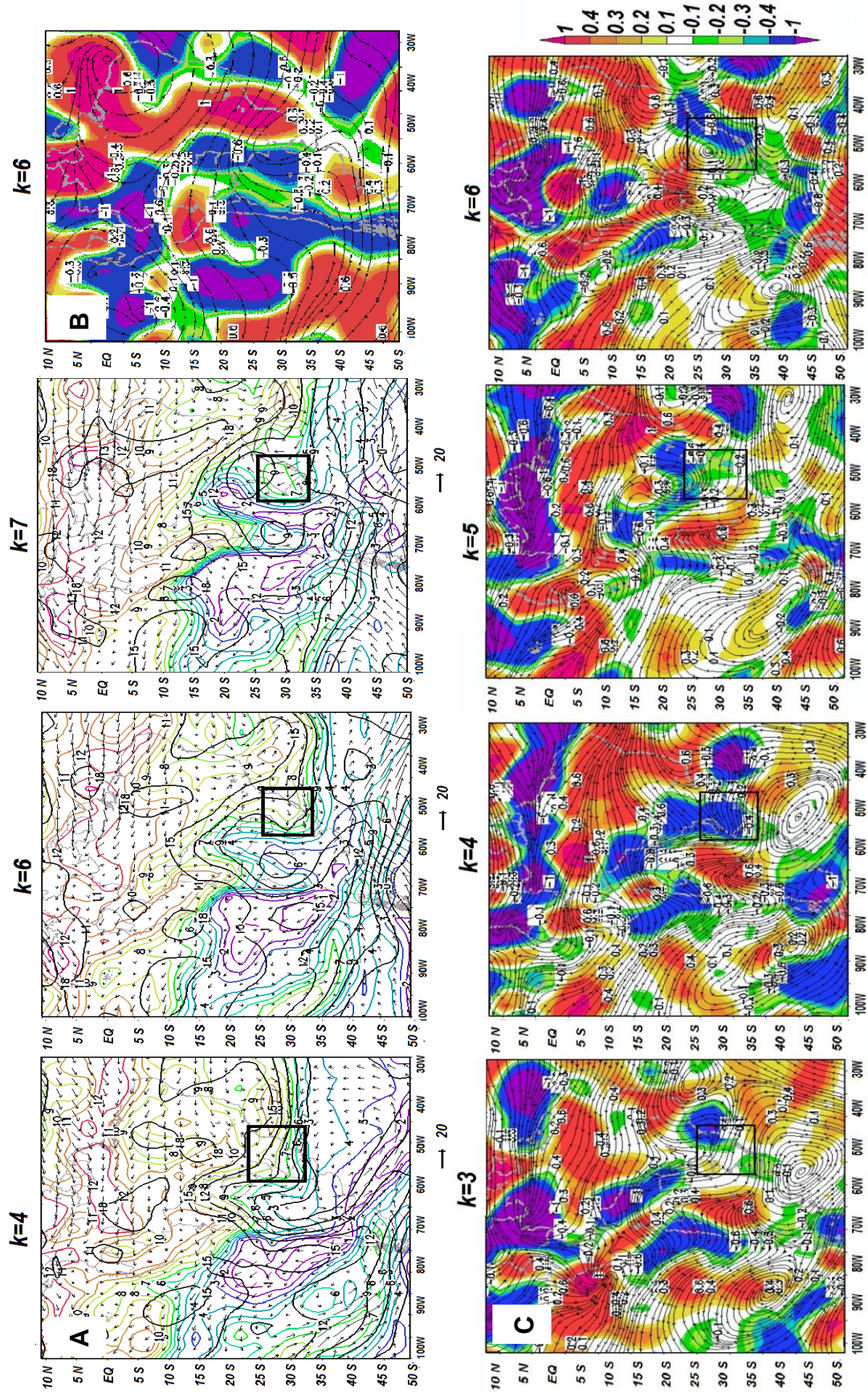


Figura 24- Mapas significativos do caso mais intenso (RS fica dentro do retângulo). (A) Temperatura em graus Celsius em linhas pretas, umidade específica (g/kg) em linhas coloridas e sentido e magnitude do vento ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e linhas de corrente do vento 200 hPa. (B) Divergência ( $10^{-4} \text{ g/kg s}^{-1}$ ) com linhas de corrente do vento em 850 hPa.



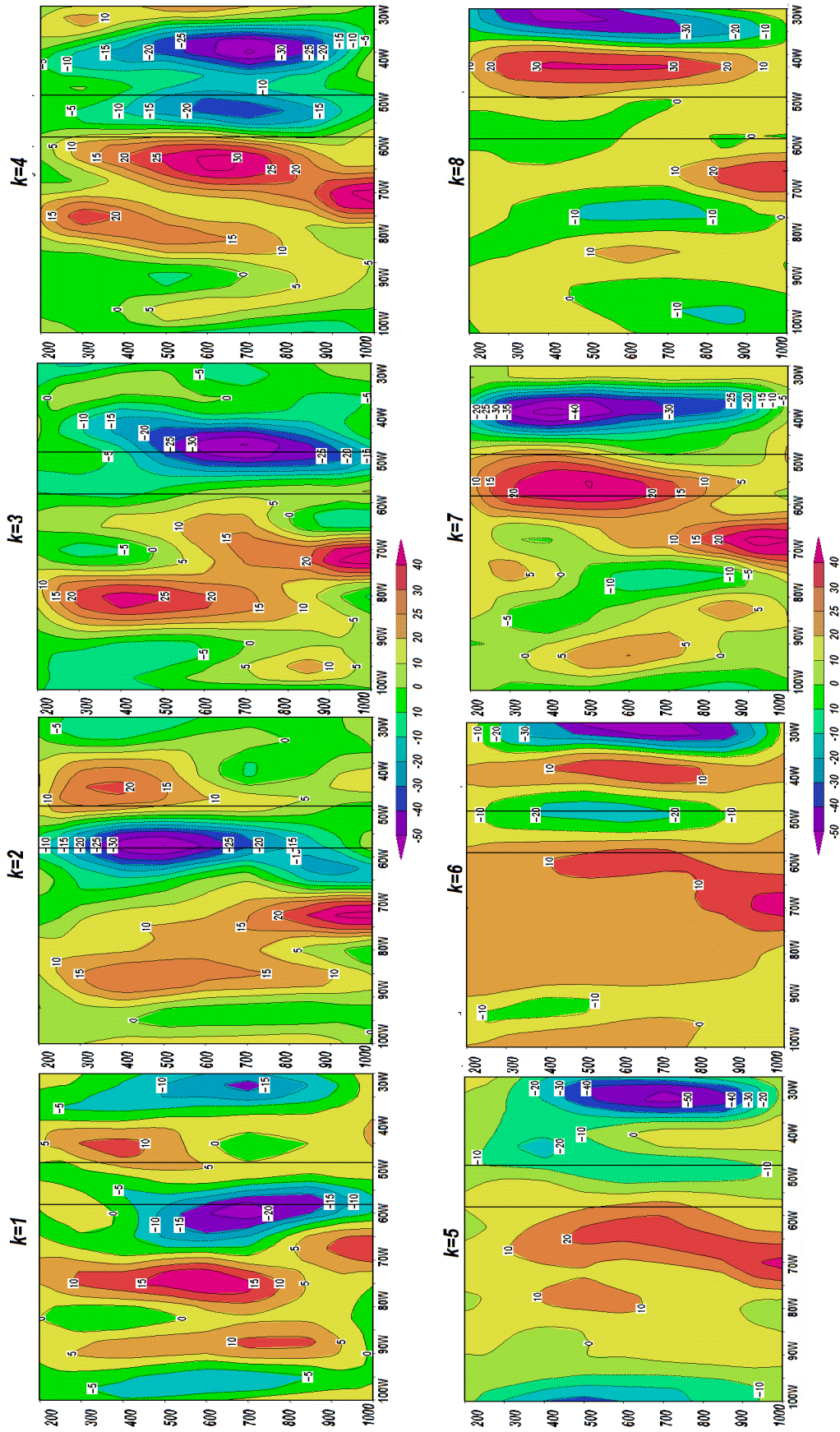


Figura 25- Mapas significativos do caso mais intenso. Média de  $\omega$  (Pa s<sup>-1</sup>) dentro das latitudes do RS (-34° e -27° latitude sul) para um corte vertical desde 1000 até 200 hPa (longitudes do RS ficam dentro do retângulo)

#### 4.3- Registro dos Principais Danos Relacionados aos CCPE.

Alguns dos CCPE causaram danos significativos à economia e à população em toda a região de estudo, segundo as informações dos Jornais Zero Hora e Agora, resumidas pela Defesa Civil do RS. A continuação, a figura 26 resume em por cento os registros dos principais danos e desastres provocados pelos CCPE.

Nas estações de inverno e primavera, se encontraram os maiores registros de reportes de enchentes e milhares de famílias desalojadas em função da chuva. Tardes mais geladas em relação à média histórica foram registradas em varias cidades do RS, declarando-se numerosas vezes a situação de emergência por dias.

O ano 2009 foi o mais significativo em relação aos danos causados pelas chuvas, quando aconteceu o fenômeno El Niño moderado e no qual aconteceram 4 CCPE na segunda metade do mesmo. Neste ano, foram registrados tornados, tempestades com granizo forte e ventos de 70-100 km/h por todo o estado e em cada um dos CCPE. No mês de novembro 2009, depois de significativos acumulados nessa primavera, aconteceram 2 casos, um depois do outro separado por uma semana. Como se tinha antes referenciado pelo INMET, o período de chuva persistente desses casos foram os que registraram a maior chuva acumulada para o mês de novembro, dentro da serie histórica desde 1909, superando os 100 mm em varias cidades do RS.

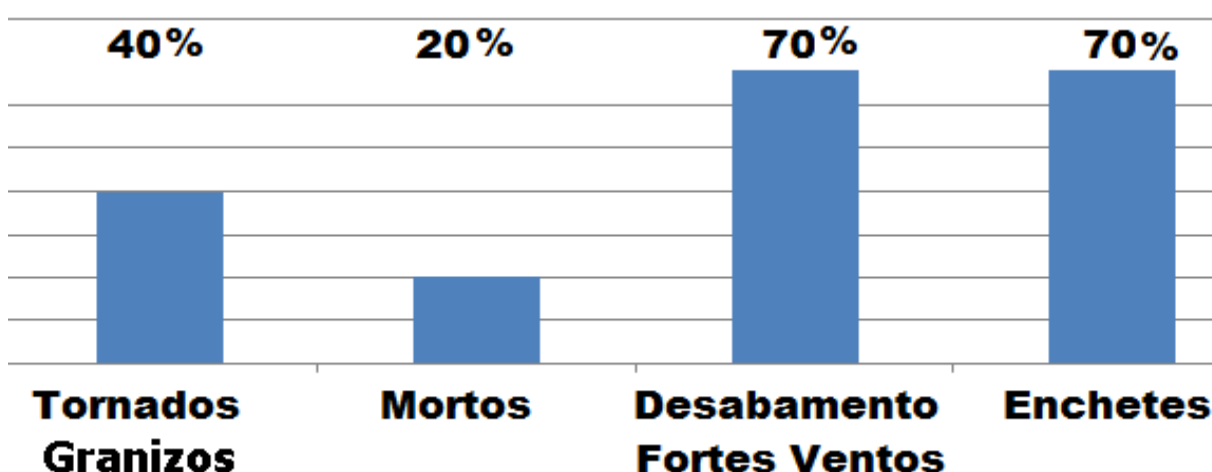


Figura 26 - Representação (%) dos principais danos registrados dos CCPE.

Adaptado do INMET e Defesa Civil do RS

## **Conclusões**

Encontrou-se uma distribuição de ocorrência de eventos de chuva persistente extrema e abrangente por todo o ano. O estudo referenciado de Nunes e Da Silva (2013) sobre chuva persistente no leste e norte de Santa Catarina, indica que os maiores números de eventos têm ocorrido no verão e outono, mas pelos resultados obtidos para o Rio Grande do Sul, observa-se que os maiores números de eventos extremos persistentes, têm preferência primeiramente no inverno e logo no verão, com acumulados de chuva menores nestas estações, principalmente no verão. No período estudado de 10 anos os CCPE são mais persistentes e intensos nas estações de transição outono e primavera, com casos de persistência de até 10 dias e os maiores acumulados médios da chuva, perto dos 200 mm.

O primeiro e mais importante dos padrões obtidos, com quase 70% da variância dos casos, indicam que as chuvas persistem por dias devido à formação de uma extensa região de baixas pressões no noroeste do RS que se desloca sobre o estado. Esse centro de baixas pressões se desloca e intensifica sobre o estado, em relação ao cavado que se desloca em superfície sobre o Atlântico a sudeste da região de estudo.

A análise dos compostos dos casos mais correlacionados, maior que 70%, mostraram condições que propiciam a instabilidade por dias na região, a partir de: um intenso cavado com pouco deslocamento na média troposfera a oeste do RS; o deslocamento em superfície de um cavado a sudeste do RS; forte confluência do vento em superfície; divergência do vento na alta troposfera; advecção da vorticidade negativa em níveis médios da atmosfera; intensa e contínua convergência do fluxo de umidade desde a região amazônica e o oceano Atlântico com altas temperaturas na camada média da atmosfera; assim como contínuos movimentos ascendentes em grande parte da troposfera. Estes resultados são

similares aos obtidos no trabalho referenciado de Gonçalves (2015) no sudeste do Brasil, além disso, ele encontrou no seu estudo um padrão de bloqueio atmosférico no oceano Atlântico.

Na análise feita dos casos menos correlacionados, por serem apenas 4 e deles 2 de inverno, em diferença ao análise feito das PSP e casos mais correlacionados, mostram melhor a chegada de um extenso anticiclone ao sul do RS. Dentro desses casos menos correlacionados, se tem a maior abrangência espacial da chuva nas cidades do RS, mas em relação aos acumulados médios, não possuem os mais significativos. A análise do caso mais intenso, com acumulado maior que 300 mm na cidade de Torres, indicou que a chuva se manteve pela formação de um ciclone quase estacionário a leste do RS, a partir de um centro de baixa pressão que se desenvolve com o passar dos dias.

A partir dos resultados antes mencionados, pode-se resumir que a chuva persistente, extrema e abrangente sobre o RS, tem relação com a aproximação ao RS de um sistema frontal semi-estacionário, que em união às condições de instabilidade existentes no continente, pode desenvolver a formação de um ciclone no oceano Atlântico ao leste do RS, o qual vai manter a chuva por dias. Sugere-se aplicar a metodologia utilizada em outras regiões do Brasil e outros países, assim como, testar a eficiência dos resultados obtidos, em prever e minimizar os danos provocados por futuros eventos.

## Referências Bibliográficas

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

BARBIERI, P. R. B. **Caracterização da estação chuvosa nas regiões sul e sudeste do Brasil associado com a circulação**. 2005. 118f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE., São José dos Campos.

BRITTO, F.; BARLETTA, R.; MENDOÇA M. Regionalização Sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, ISSN 1980-0055X, Associação Brasileira de Climatologia, Presidente Prudente, SP. v. 2, n 2, p. 35-51, 2006.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Cachoeira Paulista, SP, INPE/CPTEC, v. 16, n. 10, p. 3-27, 2001.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Cachoeira Paulista, SP, INPE/CPTEC, v 21, n.1, p. 11-24, 2006.

COMPAGNUCCI, R.; ARANEO, D.; CANZIANI, P. Principal sequence pattern analysis: A new approach to classifying the evolution of atmospheric systems., **International Journal of Climatology**, v 21, p. 197-217, 2001.

COMPAGNUCCI, R. H.; RICHMAN, M. B. Can principal component analysis provide atmospheric circulation or teleconnection patterns? **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 6, p. 703-726, 2008.

DE, U. S.; MAZUMDAR, A. B. Principal Component Analysis of Rainfall and Associated Synoptic Models of the Southwest Monsoon Over India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 64, n. 3-4, p. 213-228, 1999.

DEFENSA CIVIL DO RS. Disponível em: <[www.defesacivil.rs.gov.br](http://www.defesacivil.rs.gov.br)>. Acesso em: 25 out. 2014.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v22, n2, p. 241-254, 2007.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hPa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, p. 105-124, 2014.

GONÇALVES, J. P. C. **Caracterização e variabilidade de situações sinóticas associadas a episódios de chuva intensa e chuva persistente durante a estação chuvosa na região sudeste do Brasil**. 2015. 139f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El-Niño and La-Niña events. **Journal of Climate**, v.13, p.35-58, 2000.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. SP.: Ed. Oficina de Textos, 2009. p. 259-274.

HARNACK, R. P.; APEL, K.; CERMAK, J. R. Heavy precipitation events in New Jersey: attendant upper air conditions. **Weather and Forecasting**, v.14, p.933-954, 1999.

HUTH, R. Properties of Circulation Classification Scheme Based on the Rotated Principal Component Analysis. **Meteorology and Atmospheric Science**, v. 59, n. 3-4, p. 217-233, 1996.

JACOBET, J.; WANNER, H.; LUTERBACHER, J.; BECK, C.; PHILIPP, A.; STURM, K. Atmospheric circulations variability in the north-atlantic-european area since mid-seventeenth century. **Climate Dynamics**, v. 20, n. 4, p. 341-352, 2003.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmosphere conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.101, p.121-135, 2010.

MARENGO, J. A., ALVES, L. M., VALVERDE, M. C., ROCHA, R. P.; LABORBE, R. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5. MMA/SBF/DCBio, Brasília. 2007.

MELO, C. F., SEDIYAMA, C.; FERREIRA, A; LEAL, G; MINUSI, B. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.417-425, 2006.



MINUZZI, R.B.; LOPEZ, F.Z. Variabilidade de índices de chuva nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 697-706, 2014.

MO, K. C.; BERBERY, E. H. Drought and Persistent Wet Spells over South America Based on Observations and the U.S. CLIVAR Drought Experiments. **Journal of Climate**, v. 24, p. 1801-1820, 2011.

MOURA, C. R. W.; ESCOBAR, G. C. J.; ANDRADE, K. M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 267-280, 2013.

NASCIMENTO, M. M.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à zona de convergência intertropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, p.475-483, 2012.

NORTH, G.R.; BELL T.L.; CAHALAN R.F.; MOENG, F.J. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. **Monthly Weather Review**, v 110, p. 699–706, 1982.

NUNES, A. B.; DA SILVA, G. C. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina state: present and future climate. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, v.31, p.1-13, 2013.

ONU, "*Documento Final de la Cumbre de la Asamblea Mundial de la ONU.*" Aprovado em 24/10/2005. Disponível em: <<http://www.un.org/spanish/summit2005>>. Acesso em: 22 out. 2014.

QUADRO, M. L. F. **Estudo de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** 1994. 124f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE., São José dos Campos.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with southern oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v.42, p.81-91, 1990.

RASERA, G.; CAMPOS, R.J. Análise Sazonal das Regiões do Rio Grande do Sul Atingidas por Eventos Severos Gerados por CCM no Período de 2004 a 2008. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 36, n.2, p. 61-69, 2013.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p. 185-204, 2010.

RICHMAN, M. B., Rotation of Principal Components. **Climate and Meteorology Section**, Illinois 61820-7407, U.S.A., 1986.



SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA, P. L. D. South America. In: KAROLY, D. J.; VICENT, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Ed. American Meteorological Society, 1998. v.27, n. 49, p.119-139.

SERVIÇO METEOROLÓGICO MARINHO DO BRASIL. Disponível em: <[www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm)>. Acesso em: 5 jan. 2016.

SEVERO, D. L. **Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina**. 1994. 118f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

TEBALDI, C.; HAYHOE, K.; ARBLASTER J. M.; MEEHL, G. A. Going to extremes - An Intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. **Climatic Change**, v. 79. p. 185–211. 2006.

TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology**, v.35. p. 2045–2064. 2014.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. **Monthly Weather Review**, v.135, p.598-617, 2007.

TEIXEIRA, M. S. **Caracterização física e dinâmica de episódios de chuvas intensas nas regiões sul e sudeste do Brasil**. 2010. 219f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

TUTTLE, J. D.; DAVIS, C. A. Corridors of Warm Season Precipitation in the Central United States. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 2297- 2317, 2006.